

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines, typical of notebook paper. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры строительной механики ТГАСУ, г. Томск; lls@tsuab.ru
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ректор МГСУ, г. Москва; pavel.akimov@gmail.com
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО, г. Москва; amb@stadyo.ru
Беккер А.Т., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, научный руководитель политехнического института ДВФУ, г. Владивосток; bekker.at@dvfu.ru
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России, г. Москва; niitag@yandex.ru
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, советник РААСН, ректор ТГАСУ, г. Томск; rector@tsuab.ru
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ, г. Томск; vgg-tomsk@mail.ru
Волокитин О.Г., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, проректор по научной работе ТГАСУ, г. Томск; study@tsuab.ru
Галютин З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; z.galyutdinov@tsuab.ru
Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, профессор кафедры технологии строительного производства ТГАСУ, г. Томск; tsp_tgasu@mail.ru
Детярев В.В., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; ngasu_gts@mail.ru
Есаулов Г.В., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, проректор по научной работе МАРХИ, г. Москва; gvesaulov@raasn.ru
Ефименко С.В., докт. техн. наук, профессор кафедры автомобильных дорог ТГАСУ, г. Томск; svefimenko_80@mail.ru
Ефименко С.В., докт. техн. наук, зав. кафедрой автомобильных дорог ТГАСУ, г. Томск; svefimenko@tsuab.ru
Зайченко Н.М., докт. техн. наук, профессор, ректор ДонНАСА, г. Макеевка; mailbox@donnasa.ru
Ильичев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН, г. Москва; ilyichev@raasn.ru
Каприелов С.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. лабораторией НИИЖБ, г. Москва; kaprielov@masterbeton-mb.ru
Копаница Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; kopanitsa@mail.ru
Кудряков А.И., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; kudyakov@tsuab.ru
Кумпьяк О.Г., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; kumpyak@yandex.ru
Лотов В.А., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; valotov@ipu.ru
Люсия Тсантисис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; lucia.tsanilis@polito.it
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург; morozov@spbgasu.ru
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ, советник РААСН, г. Томск; ovssn@tsuab.ru
Орозбеков М.О., докт. техн. наук, профессор ОмГУ, г. Омск, Кыргызская Республика; oshsu@mail.ru
Поляков Е.Н., докт. искусствоведения, канд. архитектуры, профессор кафедры теории и истории архитектуры ТГАСУ, член Союза архитекторов России, г. Томск; polyakov-en@yua.ru
Ситникова Е.В., канд. архитектуры, доцент кафедры реставрации и реконструкции архитектурного наследия ТГАСУ, г. Томск; elensi@vtomsk.ru
Сколубович Ю.Л., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ректор НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; sjl1964@mail.ru
Телтаев Б.Б., докт. техн. наук, профессор, академик Национальной инженерной академии РК и Международной академии транспорта, г. Алматы, Республика Казахстан; bagdatbt@yahoo.com
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, г. Москва; travush@mail.ru
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ, г. Томск; nac.tsuab@yandex.ru
Шубенков М.В., докт. архитектуры, профессор, вице-президент РААСН, зав. кафедрой градостроительства МАРХИ, г. Москва; shubenkov@gmail.com
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН, г. Москва; niisf@niisf.ru
Чупин В.Р., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой городского строительства и хозяйства ИНИТУ, г. Ижевск; chupinvr@ex.istu.edu

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» (подписной индекс 20424) включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по строительству и архитектуре, утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 17.06.2011 г.

Электронные версии журнала «Вестник ТГАСУ» представлены на сайтах «Научная электронная библиотека»: www.elibrary.ru; «Российская книжная палата»: <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; «Российская государственная библиотека»: <https://www.rsl.ru/>; «Томская областная универсальная научная библиотека имени А.С. Пушкина»: <https://www.lib.tomsk.ru>; «EBSCO»: <https://www.ebsco.com>; «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru>; «IPRbooks»: www.iprbookshop.ru, а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tgasu.ru>

Научное издание

ВЕСТНИК ТГАСУ № 4 – 2025

ISSN 1607-1859 (для печатной версии) ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
ПИ № ФС77-81849 от 24 сентября 2021 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Редакторы Т.С. Володина, Е.А. Кулешова. Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.

Технический редактор Н.В. Удлер.

Подписано в печать 22.08.2025. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.

Уч.-изд. л. 21,44, Усл. печ. л. 25,46, Тираж 200 экз. Заказ № 34.

Дата выхода: 28.08.2025.

Цена: свободная.

Адрес редакции/издателя: 634003, Томск, пл. Соляная, 2, тел. (3822) 65-37-61, e-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru

Отпечатано в ООП ТГАСУ, Томск, ул. Партизанская, 15

16+

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2025

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL

OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 27

№ 4 2025
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

[illegible]

EDITORIAL STAFF

Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Structural Mechanics Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; lls@tsuab.ru
Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS, Rector, MGSU, Moscow, Russia; pavel.akimov@gmail.com
Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Director General Research Center StaDiO, Moscow, Russia; amb@stadyo.ru
Bekker A.T., DSc, Professor, RAACS Academician, Academic Adviser, Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; becker.at@dvfu.ru
Bondarenko I.A., DSc, Professor, RAACS Academician, Director Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, Branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia; niitag@yandex.ru
Chupin V.R., DSc, Professor, Head of Urban Planning and Economy Dept., National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia; chupinvr@ex.istu.edu
Degtyarev V.V., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; ngasu_gts@mail.ru
Efimenko V.N., DSc, Professor, Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; svefimenko_80@mail.ru
Efimenko S.V., DSc, Head of Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; svefimenko@tsuab.ru
Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia; esaulovgv@raasn.ru
Galyautdinov Z.R., DSc, A/Professor, Head of Reinforced Concrete Construction Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; z.galyautdinov@tsuab.ru
Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; tsp_gnyrya@mail.ru
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow, Russia; ilyichev@raasn.ru
Kapielov S.S., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Laboratory at Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia; kapielov@masterbeton-mb.ru
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies, TSUAB, Tomsk, Russia; kopanitsa@mail.ru
Kudryakov A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; kudryakov@tsuab.ru
Kumpyak O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; kumpyak@yandex.ru
Lotov V.A., DSc, Professor, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; valotov@tpu.ru
Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE, Saint-Petersburg, Russia; morozov@spbgasu.ru
Orozbekov M.O., DSc, Professor, Rector, Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic; oshsu@mail.ru
Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; ovssn@tsuab.ru
Polyakov E.N., DArts, Professor, Member of the Union of Architects of Russia; Theory and History of Architecture Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; polyakov-en@ya.ru
Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; sjl1964@mail.ru
Sitnikova E.V., DArts, A/Professor, Restoration and Renovation of Architectural Heritage Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; elensi@vtomske.ru
Shubenkov M.V., DArts, Professor, Head of Urban Planning Dept., Moscow Architectural Institute (State Academy), RAACS Vice President, Moscow, Russia; shubenkov@gmail.com
Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS, Moscow, Russia; niisf@niisf.ru
Teltaev B.B., DSc, Professor, Academician, National Academy of Engineering of Kazakhstan and International Academy of Transport, Almaty, Kazakhstan; bagdatbt@yahoo.com
Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician, Moscow, Russia; travush@mail.ru
Tsantilis L., A/Professor, Environment, Land and Infrastructure Engineering Dept., Polytechnic University of Turin, Turin, Italy; lucia.tsantilis@polito.it
Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; nac.tsuab@yandex.ru
Vlasov V.A., DSc, Professor, RAACS Adviser, Rector, TSUAB, Tomsk, Russia; rector@tsuab.ru
Volkov G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; vgg-tomsk@mail.ru
Volkov O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Vice-Rector for Research, TSUAB, Tomsk, Russia; study@tsuab.ru
Zaichenko N.M., DSc, Professor, Rector, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Russia; mailbox@donnasa.ru

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

Journal «Journal of Construction and Architecture» is included in the list of the peer reviewed scientific journals and editions published in the Russian Federation. The main results of PhD and DSc theses obtained in construction and architectural field studies should be published in this journal. The journal was approved by the decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education.

Decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia,
17 June, 2011

The electronic version of the journal is available at www.elibrary.ru; <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; <https://www.rsl.ru>; <https://www.lib.tomsk.ru>; <https://www.ebsco.com>; <https://cyberleninka.ru>; www.iprbookshop.ru; <https://vestnik.tsuab.ru>

Scientific Edition
VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE No 4 – 2025
Print ISSN 1607-1859 Online ISSN 2310-0044

The journal is re-registered by the Federal Supervision Service for Communication, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)
PI N FS77-81849, September 24, 2021.

Founder: Tomsk State University of Architecture and Building

Editors T.S. Volodina, E.A. Kuleshova. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 22.08.2025. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 28.08.2025.
Published sheets: 21,44. Conventional printed sheets: 25,46. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 34.

Editorial address: 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003
Phone: +7 (3822) 653-761; E-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
TSUAB Printing House, 15, Partizanskaya Str., Tomsk, 634003



© Tomsk State University
of Architecture and Building, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Поляков Е.Н., Полякова О.П. Индийский этап в творчестве Ле Корбюзье. Проект города Чандигарх (1950–1960 гг.).....	9
Алексеева А.Ю. Архитектурно-стилистический анализ культовых объектов исторического города Юрьевца рубежа XVIII–XIX вв. Часть 2	20
Малая Е.В. Архитектура лунных поселений	40
Марченко Е.Е. Планировочные особенности лесопарковых зеленых поясов.....	54
Прислонова Д.В. Архитектурное наследие купеческих промышленных комплексов городов Красноярска и Ачинска.....	60
Кулешова Е.А., Орлова Е.Ю., Герасимов А.П. Особенности региональной архитектуры Западной Сибири второй половины XIX – начала XX века.....	81

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Опбул Э.К., Ширунов Г.Н., Калдар-оол А.-Х.Б., Намчыл Е.Э. Способ усиления и расчет ослабленных участков несущих стен при устройстве в них новых проемов	95
Подшивалов И.И. Моделирование напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения расчетными методами.....	109
Вин Ко Мьинт Ту, Хан Вей Тун, Аркар Уе Хтет, Ян Лин Аунг. Технологии BIM для инфраструктуры в Мьянме	120
Киселёва В.О., Мазур В.А. Реализация методики исследования конструкций несущих элементов открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов на примере города Салехарда	133

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Копаница Н.О., Паймухин В.И. Исследование свойств механически активированного цементного камня	144
Ибе Е.Е., Миронов С.Е., Шибеева Г.Н. Эффективная керамика на основе местного сырья органических отходов Республики Хакасия	156

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Джавед Сират, Руденко А.А. Оптимизация организационных структур на эффективность реализации проектов строительства технически сложных объектов.....	172
Моршакова Л.Д., Бардина Г.А., Зацепина А.И. Технология обслуживания фасадов зданий	189

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ,
АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Картопольцев А.В. Спектральный анализ свободных колебаний балок при однократном динамическом ударном воздействии подвижной нагрузки	206
Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И., Лескина Л.М., Бормотов С.Н. Обоснование требований к проезжей части автомобильных дорог на участках с автоматическими пунктами весогабаритного контроля	221
Коденцева Ю.В., Герлейн А.Ю. Оптимальное распределение ресурсов в системе оперативного управления зимним содержанием региональной сети автомобильных дорог	233
Симчук А.Е. Экспериментальные исследования параметров воздействия расчетной нагрузки на дорожные одежды	247
Лучинский Д.П., Тимоховец В.Д., Швырёв М.В. Модернизация снежных полигонов в крупных городах Российской Федерации	269
Башарин А.Д., Чурилин В.С., Сухоруков А.В., Бадина М.В. Анализ результатов лабораторных испытаний морозного пучения грунтов	280

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Polyakov E.N., Polyakova O.P. Indian Stage in Creative Activity of Le Corbusier. Chandigarh-City Project (1950–1960).....	9
Alekseeva A.Yu. Architectural and Stylistic Analysis of Cult Sites in Small Historical Town Yuryevets at the Turn of the 18–19th Centuries. Part 2.....	20
Malaya E.V. Architecture of Lunar Settlements.....	40
Marchenko E.E. Planning of Forest-Park Greenbelts	54
Prislonova D.V. Architectural Heritage of Merchant Industrial Cities of Krasnoyarsk and Achinsk	60
Kuleshova E.A., Orlova E.Yu., Gerasimov A.P. Regional Architecture in Western Siberia Late in the 19th and Early 20th Centuries	81

BUILDING AND CONSTRUCTION

Opbul E.K., Shirunov G.N., Kaldar-ool A.-Kh.B., Namchyl E.E. Strength Analysis and Method of Load-Bearing Wall Areas Loosen by Installing New Openings....	95
Podshivalov I.I. Computational Modeling of Progressive Collapse-Induced Stress-Strain State of Columns and Assemblies in Experimental Building	109
Win Ko Myint Thu, Han Wai Htun, Arkar Ye Htet, Yan Lin Aung. BIM Technology for Infrastructure Development in Myanmar	120
Kiseleva V.O., Mazur V.A. Methodology Implementation of Load-Bearing Elements of Tank Batteries on the Example of Salekhard-City	133

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Kopanitsa N.O., Paimukhin V.I. Properties of Mechanically Activated Hydrated Cement.....	144
Ibe E.E., Mironov S.E., Shibaeva G.N. Efficient Ceramics Based on Organic Waste of the Republic of Khakassia	156

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Jawed Serat, Rudenko A.A. Optimization of Organizational Structures for Efficient Implementation of Construction Projects of Complex Engineering Objects.....	172
Morshchakova L.D., Bardina G.A., Zatsepina A.I. Building Facade Maintenance.....	189

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Kartopol'tsev A.V. Spectral Analysis of Beam Free Vibrations under One-Time Dynamic Load	206
Aleksikov S.V., Leskin A.I., Gofman D.I., Leskina L.M., Bormotov S.N. Legal Basis for Trafficway Requirements at Weight-in-Motion Control System Points.....	221
Kodentseva Yu.V., Gerlein A.Yu. The Best Resource Distribution in Operational Management System for Winter Maintenance in Regions.....	233
Simchuk A.E. Impact of Design Load Parameters on Road Pavements.....	247
Luchinskii D.P., Timokhovets V.D., Shvyrev M.V. Modernization of Snow Polygons in Cities of the Russian Federation	269
Basharin A.D., Churilin V.S., Sukhorukov A.V., Badina M.V. Laboratory Tests of Soil Frost Heaving.....	280

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 9–19.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 9–19.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-9-19

EDN: BIJYZF

ИНДИЙСКИЙ ЭТАП В ТВОРЧЕСТВЕ ЛЕ КОРБЮЗЬЕ. ПРОЕКТ ГОРОДА ЧАНДИГАРХ (1950–1960 ГГ.)

Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена значением творческого наследия Ле Корбюзье как одного из ключевых архитекторов XX в., чьи градостроительные идеи оказали существенное влияние на развитие современной урбанистики. Особый интерес представляет его работа в Индии, где он смог воплотить свои теоретические концепции в проекте города Чандигарх (1950–1960 гг.) – единственном реализованном примере планировки целого города.

Цель исследования заключается в анализе архитектурно-градостроительных решений Ле Корбюзье, заложенных в проект Чандигарха, включая его социально-политическую и эстетическую концепции, а также их влияние на формирование современного градостроительства.

В результате исследования выявлены основные социально-политические и архитектурно-дизайнерские концепции Шарля-Эдуарда, заложенные в общую схему генплана, решения пешеходно-транспортных сетей, садово-парковых зон и архитектурные решения административного центра. Проект Чандигарха демонстрирует уникальный синтез западных модернистских идей и восточного контекста, что делает его важным объектом изучения в истории архитектуры и градостроительства.

Ключевые слова: Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), Чандигарх, градостроительство, модернизм, архитектурное наследие, Индия

Для цитирования: Поляков Е.Н., Полякова О.П. Индийский этап в творчестве Ле Корбюзье. Проект города Чандигарх (1950–1960 гг.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 9–19. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-9-19. EDN: BIJYZF

ORIGINAL ARTICLE

**INDIAN STAGE IN CREATIVE ACTIVITY
OF LE CORBUSIER. CHANDIGARH-CITY PROJECT (1950–1960)****Evgenii N. Polyakov, Ol'ga P. Polyakova***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. This work is important to study the creative heritage of Le Corbuier as one of the key architects of the 20th century, whose urban planning ideas had a significant impact on the development of modern urbanism. Of particular interest is his activity in India, where he implemented his theoretical concepts in the Chandigarh city project (1950–1960).

Purpose: The aim of this work is to analyze architectural and urban planning solutions of Le Corbusier, incorporated into the Chandigarh project, including his socio-political and aesthetic concepts, as well as their influence on the formation of modern urban planning.

Research findings: The main socio-political and architectural design concepts of Charles-Edouard, are identified. They are incorporated in the general scheme of the master plan, solutions for pedestrian and transport networks, garden and park areas and architectural solutions for the administrative center. The Chandigarh project demonstrates a unique syn-thesis of Western and Eastern modernist ideas, making it an important object of study in the history of architecture and urban planning.

Keywords: Jeanneret-Gris (Le Corbusier), Chandigarh, urban planning, modernism, architectural heritage, India

For citation: Polyakov E.N., Polyakova O.P. Indian Stage in Creative Activity of Le Corbusier. Chandigarh-City Project (1950–1960). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 9–19. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-9-19. EDN: BIJYZF

Исследование посвящено «индийскому этапу» в творческой карьере Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), в ходе которого ему удалось реализовать свою давнюю мечту о строительстве города нового типа. Гениальный архитектор, живописец и инженер мечтал создать идеальный мегаполис, все составные части и элементы которого предназначены для обеспечения комфортных условий жизни жителей: «По словам архитектора, дома должны быть одновременно удобными “машинами для жилья” и “обиталищами красоты”. Недаром одна из его книг, написанная в 1933 г., была названа “Лучезарный город”...» [1].

Еще в 1922 г. Шарль начал работу над генеральным планом «Буазен» («Современный город на 3 млн жителей»). Развивая градостроительные новации барона Ж.-Э. Османа (1853–1870 гг.), он разработал свою собственную версию радикальной модернизации средневековой застройки Парижа на правом берегу Сены, которую он считал «построенной на перекрестках дорог и протоптанной копытами ослов» [1]. Архитектор планировал перестроить половину зданий французской столицы, увеличив высоту новых жилых домов до 20 этажей, создать современную систему дорог и разбить город на «квадраты», тем самым повысив комфорт проживания (рис. 1).

Идеальный город, по мнению Ле Корбюзье, должен иметь гармоничную связь с окружающим его природным ландшафтом. Все его жилые ячейки должны быть оснащены совершенным технологическим оборудованием, мак-

симально удобным в эксплуатации, и обеспечивать комфортные условия жизни для их обитателей.

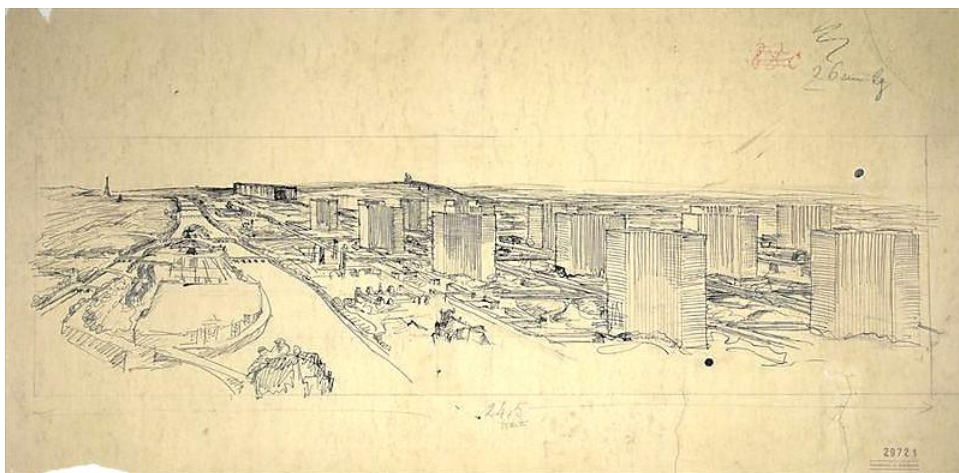


Рис. 1. Предварительный эскиз «Лучезарного города» Ле Корбюзье [1]

Fig. 1. Preliminary sketch of Le Corbusier's "Radiant City"

В 1925 г. Ле Корбюзье продемонстрировал заверченный вариант «Лучезарного города» (La ville radieuse) на Парижском Осеннем салоне: «На чертежах смелого градостроителя старые районы французской столицы, расположенные на правом берегу Сены, были уничтожены: на их месте должны были появиться 18 одинаковых небоскребов, окруженных автострадами, пешеходными зонами и парками. Проект также предполагал возведение некоторого количества малоэтажных зданий...» (рис. 2).

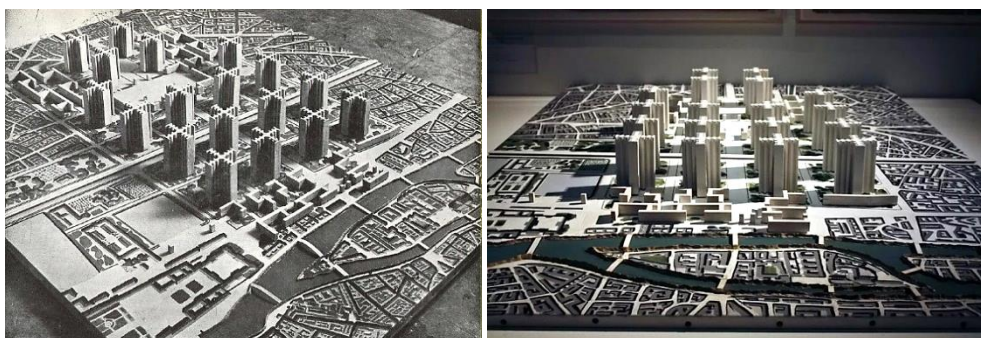


Рис. 2. Ле Корбюзье. Проект реконструкции центра Парижа. План Вуазен (Plan Voisin, 1925 г.)¹

Fig. 2. Le Corbusier. Project for the reconstruction of the center of Paris. Plan Voisin, 1925

«План Вуазен» стал своего рода сенсацией. Он неоднократно обсуждался на страницах французской прессы. Ведь общая площадь его застройки не пре-

¹ URL: https://avatars.mds.yandex.net/i?id=2021470e4381a524b118ad_1927b027_ff_1-5312795-images-thumbs&n=13

вышла 12 % от всей территории. Почти треть ее отводилась под транспортную инфраструктуру, поскольку Ле Корбюзье считал, что старые города совершенно не приспособлены для передвижения и хранения автомобилей. Дело в том, что Шарль-Эдуард имел собственный автомобиль, а в 1928 г. совместно со своим кузеном Пьером Жаннере даже разработал проект эргономичного автомобиля *Voiture Minimum* (рис. 3).

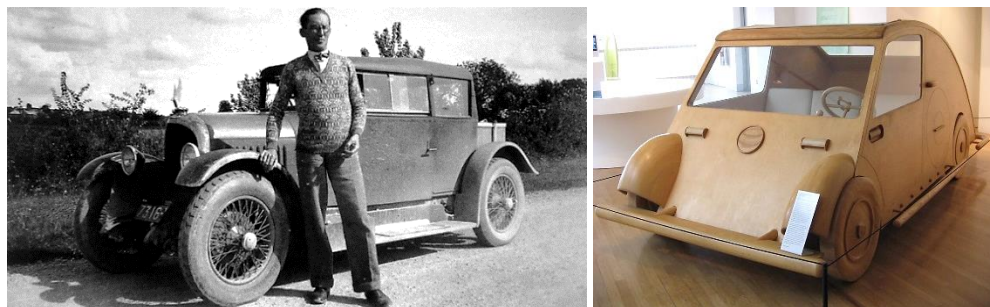


Рис. 3. Ле Корбюзье перед своим Voisin (слева); макет его минималистичного автомобиля *Voiture Minimum* (1936 г.) (справа)

Fig. 3. Le Corbusier in front of his “Voisin” (left) and model of his minimalist car “Voiture Mini-mum” (right), 1936

Ле Корбюзье, пристально следивший за развитием автомобилестроения, сумел уловить тенденции того времени – зарождающийся дух аэродинамики, рост спроса на небольшие «народные» автомобили и другие популярные в то время направления в автомобильном дизайне. Проект Ле Корбюзье не выиграл конкурс и, насколько известно, никогда даже всерьез не рассматривался крупными автопроизводителями. Тем не менее очаровательное маленькое купе оказало заметное влияние на дизайнеров того времени.

Социальную концепцию «Дом – машина для жилья» архитектор успешно апробировал в многоэтажном доме-коммуне («жилой единице») на окраине Марселя (1945–1952 гг.) [2, 3]. Однако творческие амбиции французского мастера требовали кардинального расширения масштабов проектирования.

Следует отметить, что значительную часть жизни Ле Корбюзье провел в поисках места для возведения «Лучезарного города». В этом и других своих проектах (градостроительные планы для Буэнос-Айреса, Антверпена, Рио-де-Жанейро, Алжира) зодчий развивал совершенно новые архитектурно-планировочные концепции. Он стремился повысить комфорт проживания в городах, создавая в них ландшафтные зоны, современную сеть транспортных магистралей – и все это при значительном увеличении высоты зданий и плотности населения. Таким образом мастер открыл в себе еще одну грань – урбаниста. Ему удалось реализовать свои экстравагантные замыслы во многих городах Европы, Азии, Африки, Южной Америки, СССР. Архитектурные идеи Корбюзье поражали заказчиков своей новизной. Но это были всего лишь отдельные здания, в целом не менявшие городского облика.

В 1951 г. правительство Индии, освободившейся от колониального гнета Великобритании в 1947 г., пригласило его возглавить строительство новой сто-

лицы в восточной части бывшего штата Пенджаб – г. Чандигарх. Эта территория была закреплена за Индией при разделении штата с Пакистаном. Она стала именоваться Индийский Пенджаб. В состав Пакистана вошла западная, большая по площади, часть штата, в том числе его бывшая столица – древний город Лахор (рис. 4).



Рис. 4. Карта штата Пенджаб (Индия, Пакистан)

Fig. 4. Map of the state of Punjab (India, Pakistan)

Ле Корбюзье был приглашен в Индию премьер-министром Джавахарлалом Неру (1889–1964) (рис. 5).

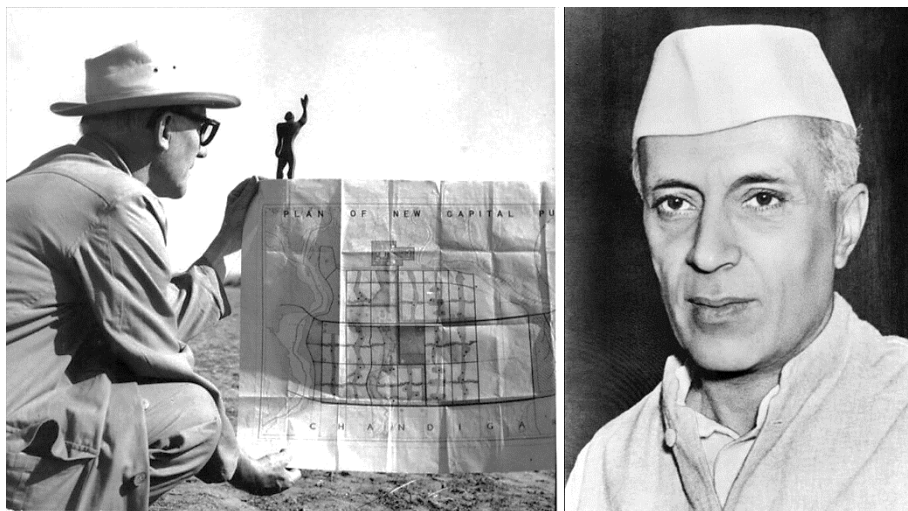


Рис. 5. Ле Корбюзье с планом Чандигарха (слева) Джавахарлал Неру – председатель Индийского национального конгресса, первый премьер-министр Индии, 15 августа 1947 г. лично поднявший флаг независимой Индии над Красным фортом в Дели (справа)

Fig. 5. Le Corbusier with a plan of Chandigarh (left) and Jawaharlal Nehru (1889–1964), the Chairman of the Indian National Congress, the first Prime Minister of India (right)

В своей внутренней политике Джавахарлал Неру был нацелен на примирение различных этнических и религиозных групп Индии, включая индуистов, мусульман и сикхов, а также на урегулирование противоречий между различными политическими партиями. В экономической сфере Неру стремился совместить принципы государственного планирования и элементы рыночной экономики, избегая при этом радикальных решений и сохраняя единство различных фракций в Конгрессе, включая правые, левые и центристские группы. Одной из задач, призванных открыть новую эру в истории страны, было строительство Чандигарха.

Поскольку в Индии в то время не было квалифицированных градостроителей, премьер-министр вынужден был обратиться за помощью к зарубежным специалистам. Первоначально разработкой генерального плана занимались Альберт Майер (США) и Мэтью Новицки (Польша). В 1949 г. они разработали генеральный план, согласно которому «город должен был быть разделен на автономные районы с собственными рынками, школами и зонами отдыха, чтобы жители могли получать доступ к основным услугам на небольшом расстоянии...» [4]. Однако внезапная трагедия – авиакатастрофа, в которой погиб Мэтью Новицки 1 сентября 1950 г., выполнивший основную часть данного проекта, а также отказ А. Майера от дальнейшей работы в силу преклонного возраста оставили проект без руководства. Должность главного архитектора Чандигарха оставалась вакантной до середины 1951 г.

Первоначально Ле Корбюзье был настроен скептически и отверг предложение двух индийских чиновников, посетивших его офис на ул. Севр, 35, в Париже в 1950 г. Однако постепенно его отношение изменилось. Стимулом для согласия стало не материальное вознаграждение (предложенная зарплата в 2000 фунтов в год была значительно ниже его обычного гонорара), а возможность воплотить в жизнь свои идеи, связанные с градостроительством и архитектурой [5].

Летом 1950 г. Ле Корбюзье начал активную работу над проектом Чандигарха. Он углубился в изучение культурного и архитектурного наследия Индии. «Понятие монументальности связывалось в его представлении с классикой – но в данном случае основанной не на европейской античности, а на классических принципах культуры Востока... Их он находил в древнеиндийском зодчестве, но в еще большей мере – в зодчестве империи Великих Моголов – ансамблях мертвого города Фатихпур-сикри и живого Джайпура. Он изучал легкие многоярусные надстройки над кровлями дворцов, глубокие лоджии и портики, абстрактно-геометрические формы громадных каменных сооружений-инструментов в обсерваториях Дели и Джайпура XVII в. Он отметил и созданную Эдвином Лютенсом планировку Нью-Дели, умелое использование единого модуля в построении плана. Все это он сопоставлял с принципами “Афинской хартии”, приемами гармонизации с помощью Модулора и, конечно же, с суровой эстетикой “грубого” бетона...» [6].

Проект был разработан всего за четыре месяца, однако его реализация сопровождалась многочисленными спорами и конфликтными ситуациями: «Уже в самом начале все его идеи вызвали бурные дебаты. Однако Джавахарлал Неру проникся доверием к Корбюзье и в течение девяти лет помогал ему в работе над Чандигархом...» [6] (рис. 6).



Рис. 6. Наложение 3D-плана на съемку города²

Fig. 6. Overlay of a 3D plan on a city survey

Ле Корбюзье рассматривал город как живой организм, полагая, что городское планирование должно отражать естественный порядок и функциональность человеческого тела. «Подобно тому, как в теле есть отдельные системы и органы, которые выполняют определенные функции в гармонии друг с другом... город должен быть организован таким образом, чтобы каждая его часть служила определенной цели, работая вместе как единое целое...» [4].

Капил Сетиа, нынешний глава города, сидит за столом под гигантским генеральным планом, занимающим большую часть стены позади него. На его визитной карточке изображен символ города – скульптура «Открытая рука» Ле Корбюзье. «Он сравнил свой план с человеческим телом, – объясняет Сетиа, – с капитальными зданиями во главе, центральным деловым районом в качестве сердца, промышленными районами на восточном фланге и зоной знаний и образования на другой стороне в качестве двух рук...» [5].

Через пять лет на плоскогорье у отрогов Гималайских гор, среди зелени бамбуковых и эвкалиптовых рощ вырос удивительно светлый и красивый город, полностью освобожденный от трущоб: «Наконец-то осуществилась мечта Ле Корбюзье о муниципальном центре, в котором архитектура находится в полной гармонии с природой и человеком...» [1].

Французский зодчий кардинально переосмыслил понятие «мегаполис». Он сохранил идею автономных секторов, заложенную в плане А. Майера, однако внес некоторые изменения. Ле Корбюзье остановился на прямоугольной системе сеток, где каждый участок был бы однородным по размеру и форме. В отличие от изогнутых дорог в плане Майера, он сделал их более прямыми, чтобы улучшить транспортное сообщение (рис. 7).

² URL: https://dzen.ru/a/W5QCl4-RYQCp_QB3?ysclid=mbd6qebaqz420171384

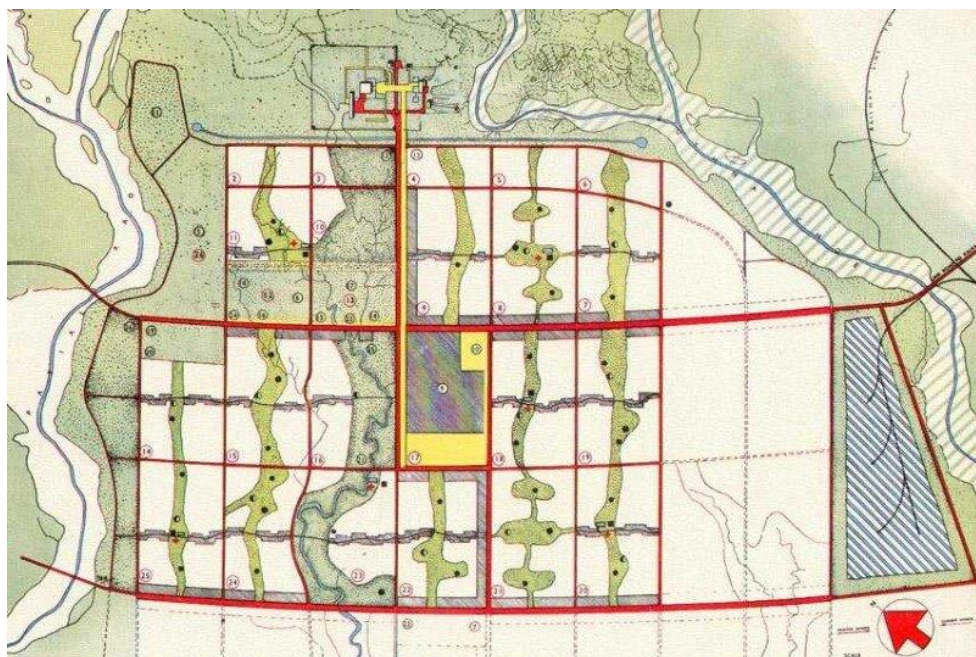


Рис. 7. Зеленые зоны в структуре города³
Fig. 7. Green areas in the city structure

Дорожная сеть не подчинена жесткой геометрии. Она «живая» и в меру криволинейна. Транспортные потоки и пешеходное движение разделены. Город пронизывают озелененные бульвары свободной планировки: «Таким образом, демонстрируется отказ от традиционного, “дорожно-тротуарного” города, господствовавшего в те годы. Простая и логичная градостроительная структура Чандигарха на многие десятилетия определила принципы проектирования городов...» (И.Г. Лежава, 12.11.2012) [7].

Город был поделен на 47 секторов, каждый размером 800×1200 м. В каждом секторе смешаны жилая, рабочая и торговая зоны. Это делает город полностью пешеходным. Все учреждения, начиная от школы и заканчивая магазинами, находятся в 10 мин ходьбы. «Транспортная система представлена дорогами разного размера от крупных магистралей до живописных зеленых улочек внутри секторов. Самые крупные магистрали делили город крест-накрест. Вдоль секторов шли зеленые пешеходные улицы с объектами социальной инфраструктуры, а поперек – проезды торговые...» [8]. В данном проекте Ле Корбюзье реализовал идею разделения транспортных путей: «Автоматриаль VI ведет к Капитолию и связывает Чандигарх с другими городами страны, V2 – это “артериальные”, главные шоссе города, V3 – проспекты, разделяющие Чандигарх на прямоугольные секторы. В этих микрорайонах живут от 5 до 25 тыс. чел. V4 – улицы с магазинами внутри секторов, V5 – кольцевая дорога микрорайонов, V6 – подъездные улицы к жилым домам, V7 – пешеходные и велослорожки. Ле Корбюзье

³ URL: https://dzen.ru/a/W5QCl4-RYQCp_QB3?ysclid=mbd6qeba9z420171384

сравнивал такое разделение с кровообращением, лимфатической и дыхательной системами человека...» [8].

Здесь нет двух одинаковых секторов, но главный принцип их построения остался единым. Как и европейские города, Чандигарх разделен не по кастам, а по уровню доходов различных групп населения: «Каждый сектор – небольшой самостоятельный город со своей инфраструктурой, школой, рынком. В центре разбит большой парк, а на окраинах – парковки. Попасть в центр сектора на собственной машине невозможно... До школ и домов жители добираются пешком или на общественном транспорте... По всему городу зеленой линией проходит долина Лейжер, оазис с водоемами и садами. Вокруг Чандигарха Корбюзье предусмотрел природную зону шириной 16 км, на которой было запрещено строить. Так он хотел сохранить город от разрастания...» [9].

Ле Корбюзье также решил проблему водоснабжения этого города, поскольку чистейшая вода залегает здесь на глубине 80 м. Поэтому на продолжении Капитолийского бульвара построили плотину и создали озеро. Архитектор категорически запретил движение моторных лодок по этому озеру, не разрешался также проезд транспорта по окружающей его дороге: «Он также запретил вечернее освещение за исключением полускрытого “бивуачного” подсвета газонов. Поэтому в ночное время в воде отражались звезды, днем – горы и небо; и все это – в абсолютной тишине. При создании озера на плотине был установлен мемориальный камень, на котором на четырех языках: хинди, пенджабском, урду и английском – начертано: “Создатели Чандигарха подарили это озеро и эту плотину гражданам нового города, чтобы избавить их от монотонности городской жизни, чтобы они наслаждались красотой природы в мире и тишине”...» [8].

Как ни странно, город Чандигарх до сих пор не разросся. При жизни Ле Корбюзье было построено 30 городских секторов, сейчас их число увеличилось до 57. Население Чандигарха превышает миллион человек. Благодаря рациональной планировке, заложенной Ле Корбюзье, Чандигарх избежал перенаселенности и хаотичной застройки – проблем, характерных для многих крупных городов Азии. Каждый дом в этом городе имеет водопровод и электрическое освещение. Правительственные здания, объединенные в ансамбль, выглядят торжественно, величаво и без угнетающей простого человека монументальности.

Таким образом, проект Чандигарха стал уникальным примером воплощения градостроительных идей Ле Корбюзье, сочетающим функциональность, эстетику и гармонию с природой. Переосмысление концепции «города как живого организма», реализация принципов зонирования пространства, разделения транспортных потоков и пешеходных зон, акцент на экологическую составляющую сохраняют актуальность и сегодня.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Семенова С. Чандигарх: Город Солнца – триумф великого архитектора // Большая Азия : электронное издание : [сайт]. URL: <https://bigasia.ru/publication/chandigarh-gorod-solnca-triumf-velikogo-arhitekтора/?ysclid=ma4wgpwb3h850492175> (дата обращения: 11.06.2025).
2. Поляков Е.Н., Полякова О.П., Воевода Ю.Е. Дома-коммуны в архитектурном наследии Ле Корбюзье. «Жилая единица» в Марселе (1945–1952) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 24–43.

3. Поляков Е.Н., Полякова О.П., Воевода Ю.Е. Организация внутреннего пространства Марсельской «жилой единицы» (Ле Корбюзье, 1945–1952 гг.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 25–43.
4. Чандигарх Ле Корбюзье: модернистский город, построенный с нуля // The Culture Map. URL: <https://theculturemap.com/le-corbusier-chandigarh-architecture/> (дата обращения: 10.06.2025).
5. Crabtree James. Le Corbusier's Chandigarh: an Indian city unlike any other // Financial Times. 2015. Jul 3. URL: <https://www.ft.com/content/2a194cb4-1a8d-11e5-a130-2e7db721f996> (дата обращения: 11.06.2025).
6. Иконников А.В. Архитектура XX века: Утопии и реальность. В 2 томах / А.В. Иконников. Москва : Прогресс-Традиция, 2001. Т. 1. 654 с. ISBN 5-89826-096-X.
7. Лежава И.Г. Ле Корбюзье. Города // Totalarch. URL: <https://corbusier.totalarch.com/lezhava/2> (дата обращения: 10.06.2025).
8. Чандигарх: идея через пятьдесят лет // PORT Russia. URL: <https://port-magazine.ru/architecture/chandigarh/> (дата обращения: 01.06.2025).
9. Троицкая М. Чандигарх – город в Индии, который с нуля построили Ле Корбюзье и Пьер Жан-нере // Perito. URL: <https://perito.media/posts/india-chandigarh?ysclid=mb1tvuacq9726864557> (дата обращения: 01.06.2025).

REFERENCES

1. Chandigarh. The City of the Sun is the triumph of a great architect. Available: <https://big-asia.ru/publication/chandigarh-gorod-solnca-triumf-veli-kogo-arhitekora?ysclid=ma4wgpwb3h850492175> (accessed June 11, 2025). (In Russian)
2. Polyakov E.N., Polyakova O.P., Voevoda Yu.E. Communal Houses in Architectural Heritage of Le Corbusier. Unité d'Habitation (1945–1952). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (6): 24–43. (In Russian)
3. Polyakov E.N., Polyakova O.P., Voevoda Yu.E. Interior Organization in Unité D'habitation (Le Corbusier, 1945–1952). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (1): 25–43. (In Russian)
4. Chandigarh Le Corbusier: a modernist city built from scratch. Available: <https://theculturemap.com/le-corbusier-chandigarh-architecture/> (accessed June 11, 2025).
5. Cranbry J. Chandigarh Le Corbusier: an Indian city unlike any other. Available: www.ft.com/content/2a194cb4-1a8d-11e5-a130-2e7db721f996 (accessed June 11, 2025).
6. Ikonnikov A.V. Architecture of the 20th century. Utopias and reality. Volume I. It's a progress Tradition., Vol. 1. Moscow, 2001, 654 p. ISBN 5-89826-096-X. (In Russian)
7. Lezhava I.G. Le Corbusier. Cities. Available: <https://corbusier.totalarch.com/lezhava/2> (accessed June 11, 2025).
8. Chandigarh: an idea through fifty years. Available: <https://port-magazine.ru/architecture/chandigarh/> (accessed June 11, 2025). (In Russian)
9. Troitskaya M. Chandigarh is a city in India, which was built from scratch by Le Corbusier and Pierre Jeanneret. Available: <https://perito.media/posts/india-chandigarh?ysclid=mb1tvuacq9726864557> (accessed June 11, 2025)

Сведения об авторах

Поляков Евгений Николаевич, докт. искусствоведения, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, polyakov.en@yandex.ru

Полякова Ольга Павловна, канд. экон. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, orppp2010@yandex.ru

Authors Details

Evgeny N. Polyakov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, polyakov.en@yandex.ru

Olga P. Polyakova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, oppopp2010@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.06.2025
Одобрена после рецензирования 20.06.2025
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 05.06.2025
Approved after review 20.06.2025
Accepted for publication 26.06.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 20–39.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 20–39.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.035.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-20-39

EDN: CNSVUU

АРХИТЕКТУРНО-СТИЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КУЛЬТОВЫХ ОБЪЕКТОВ ИСТОРИЧЕСКОГО ГОРОДА ЮРЬЕВЦА РУБЕЖА XVIII–XIX ВВ. ЧАСТЬ 2

Анна Юрьевна Алексеева

*Новосибирский государственный университет архитектуры,
дизайна и искусств им. А.Д. Крячкова, г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Изучение архитектуры культовых сооружений исторического малого города Юрьевца обусловлено угрозой утраты его исторического облика. Архитектурно-стилистический анализ культовых построек, созданных на рубеже XVIII–XIX вв., предполагает их классификацию по стилевым признакам. Также анализ архитектурных решений данных объектов, возводившихся с ориентацией на каноны «образцового» зодчества, позволяет выявить региональную интерпретацию общепринятых стилистических принципов.

Цель работы. Анализ адаптации столичной архитектурной тенденции к местным условиям в храмовом зодчестве г. Юрьевца на рубеже XVIII–XIX вв.; выявление роли государственной стандартизации в формировании единого облика русских городов.

Результаты исследования. Выявлены этапы развития каменного храмового строительства в Юрьевце, связанные с административными реформами. Установлено влияние профессиональной практики губернских архитекторов (Н.И. Метлин, П.И. Фурсов) на синтез классицизма с региональными особенностями. Проанализированы стилевые отличительные свойства ключевых объектов, а именно сочетание барочных элементов с лаконичностью классицизма, доминирование симметрии и функциональности. Доказано, что храмы, подчиненные принципам регулярной планировки, стали визуальными доминантами.

Выводы. Стиль классицизм в архитектуре Юрьевца стал инструментом имперской культурной унификации, вытесняя локальное разнообразие в пользу стандартизации. Архитектурные решения отражали идеологию централизации, сохраняя при этом региональную идентичность за счет адаптации столичных проектов к местным условиям. Исследование подтверждает необходимость реставрации сохранившихся объектов как носителей исторической памяти и уникального синтеза стилей.

Ключевые слова: храмовая архитектура, классицизм, объемно-пространственная композиция, стилевые особенности, провинциальное зодчество

Для цитирования: Алексеева А.Ю. Архитектурно-стилистический анализ культовых объектов исторического города Юрьевца рубежа XVIII–XIX вв. Часть 2 // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 20–39. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-20-39. EDN: CNSVUU

ORIGINAL ARTICLE

**ARCHITECTURAL AND STYLISTIC ANALYSIS
OF CULT SITES IN SMALL HISTORICAL TOWN YURIEVETS
AT THE TURN OF THE 18–19th CENTURIES. PART 2****Anna Yu. Alekseeva***Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts,
Novosibirsk, Russia*

Abstract. The study of religious building architecture in the small historical town Yurievets is conditioned by a threat of disappearance of its original appearance.

Purpose: Analysis of the adaptation of the capital's architectural tendency to local conditions in the temple architecture of the small historical town Yurievets at the turn of the 18–19th centuries, revealing the role of state standardization in the formation of a unified image of Russian cities.

Methodology/approach: According to the architectural and stylistic analyses of religious buildings, they are classified by architectural styles. The analysis of architectural solutions of objects built with a focus on the canons of "exemplary" architecture, allows identifying generally accepted stylistic principles.

Research findings: The development stages are shown for masonry construction in Yurievets. The influence of provincial architects (N.I. Metlin, P.I. Fursov) on the synthesis of classicism with regional peculiarities is shown. Architectural styles of the key objects are analyzed, namely the combination of Baroque elements with the conciseness of classicism, the dominance of symmetry and functionality. It is proved that temples are visual dominants, subordinated to the principles of ordered layout.

Value: Classicism in the Yurievets architecture is an instrument of imperial cultural unification, suppressing local diversity in favor of standardization. Architectural solutions reflect the ideology of centralization, while preserving regional identity through the adaptation of capital's projects. It is shown that preserved objects require restoration, as they are carriers of historical memory and unique synthesis of styles.

Keywords: spatial composition, temple architecture, architectural style, provincial architecture, classicism

For citation: Alekseeva A.Yu. Architectural and Stylistic Analysis of Cult Sites in Small Historical Town Yurievets at the Turn of the 18–19th Centuries. Part 2. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 20–39. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-20-39. EDN: CNSVUU

Введение

Архитектурно-стилистический анализ культовых объектов малого исторического города Юрьевца раскрывает динамику взаимодействия локальных традиций и общероссийских градостроительных тенденций конца XVIII – первой половины XIX в. Исследование охватывает ключевые этапы формирования храмового зодчества, отражающие переход от стихийной средневековой застройки к планомерной организации городского пространства в рамках административных реформ Российской империи. Юрьевец, включенный в 1708 г. в систему губернского деления, стал наглядным примером трансформации провинциальной архитектуры под влиянием государственной стандартизации. Переход города в 1778 г. в состав Костромского наместничества, а затем одноименной губернии (1796 г.) стимулировал новый этап каменного строитель-

ства, связанный с деятельностью губернских архитекторов – Н.И. Метлина и П.И. Фурсова. Их проекты воплощали синтез академического классицизма и региональных особенностей зодчества.

Предметом исследования являются стилистические особенности архитектуры культовых зданий и сооружений г. Юрьевца, созданных на рубеже XVIII–XIX вв.

Основной целью исследования является характеристика стилистического своеобразия объектов храмового зодчества г. Юрьевца, относящихся к рубежу XVIII–XIX вв.

Актуальность исследования обусловлена физической деградацией, угрозой исчезновения и объективной малоизученностью архитектурного наследия исторического города Юрьевца.

Методологическая основа включает стилистический анализ объемно-пространственных решений, декоративных элементов и конструктивных особенностей храмов. Ключевыми источниками стали архивные документы, а именно описание Костромской епархии 1863 г., чертежи, визуальные материалы, а также натурные исследования. В своих трудах изучением истории архитектуры г. Юрьевца как интерпретации общих тенденций развития архитектуры в духе местных традиций занимались Н.А. Мерзлютина, Б.А. Владимиров, И. Антонов, Л. Полякова, Л. Шлычков и др.

Архитектурно-стилистический анализ – метод исследования и оценки архитектурных объектов, направленный на определение их отличительных черт. Этот процесс охватывает изучение параметров композиционной целостности, морфологических признаков, стилевых особенностей, функционально-типологических свойств, позволяя раскрыть архитектурный облик исторического города.

Материалы и методы исследования

Работа включает в себя подробное изучение на местности архитектурных объектов выбранного поселения и анализ научных источников: публикаций, литературных источников и архивных документов. Применение экспертной оценки и сравнительного анализа в методике исследования обеспечивает достоверность его результатов. Данная методика основана на опыте предшествующих исследований.

Результаты

Каменное храмовое зодчество Юрьевца зародилось на рубеже эпох, ознаменовавшем переход к Новому времени. В XVIII в. Российская империя начала внедрять принципы планомерной градостроительной организации, постепенно трансформируя сложившуюся стихийную застройку населенных пунктов. На примере Юрьевца видно, как в период с 1708 г. по 1850-е гг. реализовывалась концепция регулярной планировки [1, с. 79]. Данные преобразования стали частью масштабной административной реформы, которая затронула и сферу проектирования русских городов. Государство сосредоточилось на стандартизации строительных норм и повсеместном применении типовых архитектурных решений как в зодчестве, так и в планировке городских пространств.

Особое значение в формировании облика русских городов этого периода имели православные храмы. Они, как архитектурные доминанты, созданные с учетом принципов регулярности, определяли силуэты и композиционные оси городской среды Юрьевца в XVIII–XIX вв. Таким образом, культовые сооружения не только сохраняли сакральные функции, но и становились важнейшими элементами пространственной организации, подчиняясь новым градостроительным концепциям эпохи.

В Юрьевце каменное церковное зодчество развивалось в несколько этапов. Благовещенский храм (не сохранился), сооруженный в 1702 г., вместе с другими каменными церквями XVIII в. отражал преемственность древнерусских архитектурных традиций. **Богоявленская церковь** (1719–1720 гг.), следующая за Благовещенской, и сегодня остается старейшим каменным сооружением города. Оба памятника демонстрируют синтез элементов узорочья и нарышкинского барокко, представляя бесстолпные пятиглавые храмы.

Среди значимых объектов периода выделяется **Входоиерусалимский собор** (1733 г.), воплотивший позднюю интерпретацию костромской храмовой архитектуры. К середине XVIII в. относятся одноглавые бесстолпные церкви – утраченная Преображенская церковь (1746–1762 гг.) и реставрируемая Сретенская (1757 г.). Утраченный Казанский храм (1754 г.) иллюстрировал характерный для нарышкинского барокко прием «восьмерик на четверике», тогда как несохранившаяся Покровская церковь (1764 г.) оригинально сочетала пятиглавие с крестообразным планом.

Затишье в каменном строительстве после 1764 г. сменилось новым подъемом на рубеже XVIII–XIX вв., связанным с административными изменениями, а именно включением Юрьевца в Костромское наместничество (1778 г.) и последующее образование губернии (1796 г.). Этот период отмечен масштабной реконструкцией соборного ансамбля – перестройкой Входоиерусалимского храма по проекту Н.И. Метлина, созданием Успенского собора архитектором П.И. Фурсовым и возведением пятиярусной колокольни. Новые каменные церкви сменили деревянных предшественников, а существующие храмы обрели колокольни, формируя уникальный архитектурный облик города (рис. 1).



Рис. 1. Лист из альбома «Виды городов и деревень Костромской губернии». Художник А. Корионов. Составитель Таратоев. 1855 г. Бумага, акварель

Fig. 1. Views of towns and villages of Kostroma province. 1855. Painter: A. Koryonov

Предтеченская церковь. Каменная церковь была построена в честь Иоанна Предтечи в 1800 г. на Георгиевской горе, с каменной колокольней. В «Статистическом описании соборов и церквей Костромской епархии» 1863 г., составленном протоиереем Иоанном Беляевым, упоминается: «Престолы: во славу Иисуса Христа Спасителя, празднования Его нерукотворного образа и в честь св. Иоанна Предтечи и св. благоверного князя Дмитрия, царевича Московского...» [2, с. 200].

На сегодняшний день о Предтеченском храме не обнаружено дополнительной визуальной информации. Изображение храма запечатлено на одной из двух картин сер. XIX в. художника Сухова (рис. 2). Судя по изображению, каменная церковь Святого Иоанна Предтечи на горе была построена в стиле классицизм и представляла собой небольшой одноглавый храм с двухпридельной трапезной и колокольней.



Рис. 2. Каменная Предтеченская церковь на картине художника Сухова. Середина XIX в. Историко-художественный музей г. Юрьевца

Fig. 2. Predtechenskaya Church. The middle of the 19th century. Painter: Sukhov, Historical and Art Museum of Yuryevets

Однако в 1895 г. церковь была перенесена фабрикантом П. Миндовским при содействии добровольных жертвователей в район Курени, где служила местом богослужения для рабочих Юрьевецкой льночесально-прядельной фабрики.

Также у И. Беляева [2, с. 200] указано, что к каменной церкви была приписана деревянная **Печерская церковь**, построенная в 1756 г. (рис. 3).



Рис. 3. Деревянная Печерская церковь. Фотография 1919 г. Предоставлена Государственным научно-исследовательским музеем архитектуры имени А.В. Щусева

Fig. 3. Pecherskaya Church, 1919, Shchusev State Scientific Research Museum of Architecture

Петропавловская церковь (1806 г.). Каменная церковь Петра и Павла была возведена в 1806 г. В «Статистическом описании соборов и церквей Костромской епархии» 1863 г. Петропавловская церковь упоминается как подчиненная Вознесенскому храму, без колокольни и без совершения богослужений [2, с. 202]. Век церкви краток, что подтверждается архивными сведениями Императорской Археологической комиссии: «Безъ колокольни, ветхая (1863 г.). Богослужения во церкви не совершаются...» [3, с. 282]. В это время Юрьевец был богат храмами, поэтому закрытие одного из них сказалось в основном только на приходе.

Более ранние упоминания о церкви в писцовых книгах отсутствуют. Одним из первых источников является карта города 1779 г., составленная землемером, инженером-прапорщиком Федором Гине, где Петропавловская церковь показана деревянной. «В городе Юрьевце-Повольском приходская Петропавловская церковь с приделом Димитрия митрополита Ростовского деревянная... Церковь Петропавловская с древних лет существует с какого времени не известно. Нынешняя деревянная построена в 1773 г.; вторая – каменная в 1805 г. иждивением прихожан и вкладами добрых людей» – трактуется в Ведомостях 1819 г. [4]. Эти сведения позволяют проследить эволюцию архитектурного облика церкви и потребностей прихожан в течение времени.

В открытых источниках не представлено изображений храма в его первоизданном виде, и сейчас можно судить об архитектурном облике лишь по одной из картин местного художника Сухова (рис. 4).



Рис. 4. Петропавловская церковь на картине художника Сухова. Середина XIX в. Историко-художественный музей г. Юрьевца

Fig. 4. Peter and Paul Church. The middle of the 19th century. Painter: Sukhov, Historical and Art Museum of Yuryevets

Сохранившиеся изображения храма позволяют сделать вывод, что кирпичная церковь имела строгий и лаконичный декор, присущий стилю классицизм,

для которого характерен акцент на симметрии и простоте линий. С точки зрения объемно-пространственной композиции храм состоял из невысокого двусветного четверика, перекрытого купольной кровлей с люкарнами, с трапезной с западной стороны, без колокольни, и с пятигранной апсидой – с восточной.

В настоящее время архитектура храма существенно изменена: в его здании расположен продуктовый магазин. Изначально храм был закрыт еще до революции по решению епархиального управления. На его месте была типография, а после революции – кинотеатр «Волга» (рис. 5). Именно в этом кинотеатре впервые в 1990 г. был показан фильм Андрея Тарковского «Андрей Рублев» в полной авторской версии.



Рис. 5. Архитектура Петропавловской церкви. Кинотеатр «Волга». Архивное фото сер. XX в.
Fig. 5. Peter and Paul Church. The Volga Cinema. 20th century

Рождественская церковь (1815 г.). В «Статистических описаниях соборов и церквей Костромской епархии» 1863 г. указывается: «Каменная, с каменной колокольней, построена в 1815 г. Престол: во славу Рождества Иисуса Христа и в честь Божией Матери, празднования Рождества и святых мучеников Бориса и Глеба...» [2, с. 201].

Начало истории храма относится к периоду, значительно предшествующему 1815 г. Согласно архивным записям писцовой книги 1676 г.: «На указанном погосте началось возведение новой церкви, освященной в честь Рождества Христова» [5]. Для реализации этого проекта городские власти выделили под строительство наиболее благоприятный участок из имеющихся земель.

Церковь Рождества Христова – архитектурный памятник, который дошел до наших дней без каких-либо изменений во внешнем облике. Единственным значительным утраченным элементом является колокольня. Церковь примыкает к городскому ансамблю и играет важную роль в формировании городской пространственной композиции, завершая перспективу Георгиевской улицы, которую можно видеть на старых фотографиях (рис. 6).



Рис. 6. Юрьевец, Костромская губерния Рождественская церковь слева. Открытка нач. XIX в. Государственный музей истории Санкт-Петербурга

Fig. 6. Yuryevets, Kostroma province. Christmas Church. 19th century. The State Museum of the History of Saint-Petersburg

Храм включен в Свод памятников архитектуры и монументального искусства Ивановской области и представляет собой яркий пример архитектурной гармонии в объемно-пространственном решении [6, с. 739–741].

Основной объем здания формируется высоким двухъярусным четвериком, верхний ярус которого имеет срезанные углы, что отсылает к традиционной композиции нарышкинского стиля к. XVII в. («восьмерик на четверике»). Венчает здание восьмигранный барочный купол с люкарнами и двухъярусный световой барабан (нижний ярус – восьмигранник, верхний – цилиндр). С восточной стороны выступающая скругленная апсида, а с запада расположена трапезная с двумя симметричными приделами (перестроенными в середине XIX в.) и паперть, служившая ранее основанием колокольни (рис. 7).

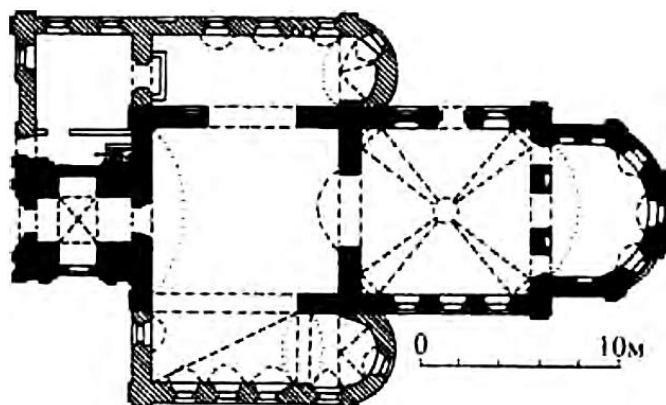


Рис. 7. План Рождественской церкви. Свод памятников архитектуры и монументального искусства

Fig. 7. The Christmas Church layout. Collection of architectural monuments and monumental art

Барочная объемная структура памятника (купол, люкарны, световой барабан) гармонично сочетается с элементами декора в стиле зрелого классицизма (рис. 7). Архивольты, импосты и замковые камни на высоких арочных проемах подчеркивают этот контраст. Фасады украшены пилястрами, филёнками и фронтонами. Арочные окна и фальшпроёмы формируют ритмическую структуру, акцентируя вертикальную динамику здания.

Таким образом, пространственная композиция и декор создают выразительный образ монументальности и изящества (рис. 8). В интерьере храма сохранилась клеевая живопись XIX в. в традициях барокко с многофигурными композициями.



Рис. 8. Юрьевец. Церковь Рождества Христова. Вид с востока. Фото автора, 2024 г.

Fig. 8. The Church of the Nativity in Yurievets, 2024. Photo by the author

Троицкая церковь (1819 г.). Место, на котором расположена Троицкая церковь в Юрьевце, имеет глубокие исторические корни, связанные с ранними славянскими поселениями. По мнению академика А.А. Спицына, еще до основания города на Троицкой горе существовала первая каменная церковь, построенная до монгольского нашествия как ориентир для пути на Север вдоль р. Унжи [7, с. 3].

Первое письменное упоминание о деревянной Троицкой церкви относится к 1676 г. В писцовой и межевой книгах по г. Юрьевцу сообщается: «Церковь деревянная во имя Живоначальные Троицы, в пределах – Пречистые Богородицы Введения да Гурия и Варсонофия, Казанских чудотворцев, – рублена

с трапезою, на четыре угла, верхи бочками; главы круглые, обиты чешуею, кресты деревянные, обиты железом немецким белым. Покрыта церковь и трапеза, и паперть тесом...» [5, с. 33–35].

В «Статистических описаниях...» указывается, что в 1819 г. на месте обветшавшей деревянной церкви был возведен каменный храм [2, с. 199].

По своей архитектурной форме каменная Троицкая церковь представляла двусветный четверик, перекрытый сводом с люкарнами (рис. 9). С запада к основному объему примыкала трапезная с двумя приделами, а с восточной стороны к основному объему примыкала скругленной формы апсида. Главный вход в храм расположен с западной стороны. Колокольня, сооруженная в 1792 г. на западной стороне церкви, в одном ярусе деревянная [7]. Проектная документация храма, к сожалению, не сохранилась.



Рис. 9. Троицкая церковь. Юрьевец. Архивное фото нач. XX в. Русский контур
Fig. 9. Trinity Church in Yuriyevets. 20th century. Archival photo

В 1930-х гг. церковь была закрыта, а венчания храма и колокольни сломаны. Позже, в 1970 г., здание было перестроено под производственные нужды, был сохранен лишь фрагмент трапезной. Фотографии позволяют судить о былом величии храма, строгих форм классицизма и монументальности.

Церковь Сошествия Святого Духа (1819–1839 гг.) – каменная церковь. Наиболее старый ее центральный объем был построен в 1839 г. на средства купца Ивана Васильевича Полякова. Расположена на возвышенной северной окраине города посреди кладбища. В книге Б.А. Владимирова указано, что однопредельный храм был возведен «в честь Сошествия Святого Духа на апостолов» [7, с. 11].

Архитектурный ансамбль, выполненный из кирпича в традициях позднего классицизма, демонстрирует вытянутую прямоугольную трехчастную композицию с осевым расположением элементов (рис. 10).

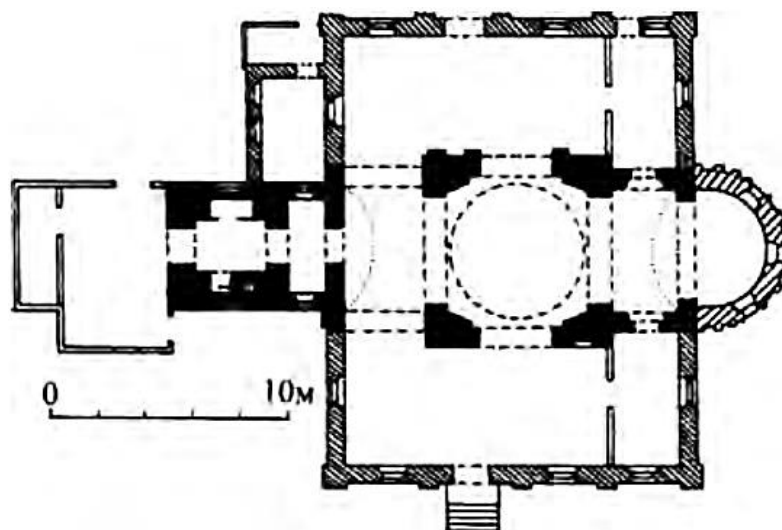


Рис. 10. План церкви Святого Духа. Свод памятников архитектуры и монументального искусства
 Fig. 10. The Church of the Holy Spirit layout. Collection of architectural monuments and monumental art

Главный объем зданий формирует массивный четверик, служащий основанием для приземистой ротонды, увенчанной полусферическим куполом и маковочной главкой. С восточной стороны к основному объему примыкает прямоугольная апсида, а с запада – трапезная с притвором. Во второй половине XIX столетия к сооружению добавили трехъярусную колокольню, интегрированную с западной частью здания через переход-тамбур (рис. 11). Ее венчает купольное завершение, дополненное декоративными люкарнами и многогранным барабанчиком, на котором установлен невысокий шпиль с крестом. Описание колокольни содержится в «Своде памятников архитектуры и монументального искусства по Ивановской области»: «Арочные проемы в нижнем ярусе колокольни оформлены архивольтом с замковым камнем, аналогично проемам первоначальной апсиды. Во втором четверике, увенчанном пологими фронтонами, узкие арочные проемы помещены в широкие ниши той же формы с профилированным архивольтом, опирающимся на приземистые лопатки. В декоре верхнего стройного четверика с высокими арками звона многократно повторяются горизонтальные профили: в завершении малых и больших пилястр, в замковых камнях, в раскрепованном карнизе. Аналогично декорированы завершения ложных люкарн и барабана...» [6, с. 742].

В середине XX в. архитектурный облик здания претерпел значительные изменения: сооружение было существенно расширено за счет симметричных боковых пристроек. Для интеграции новых объемов с исторической частью в несущих конструкциях были пробиты большие арочные проемы. Дальнейшая трансформация произошла в 1984 г., когда к восточному фасаду была добавлена полукруглая алтарная апсида, характерная для традиционного храмового зодчества (рис. 12). Экстерьер сооружения демонстрирует смешение материалов: несущие стены скрыты под слоем декоративной штукатурки, тогда как колокольня сохранила аутентичный кирпичный рельеф.

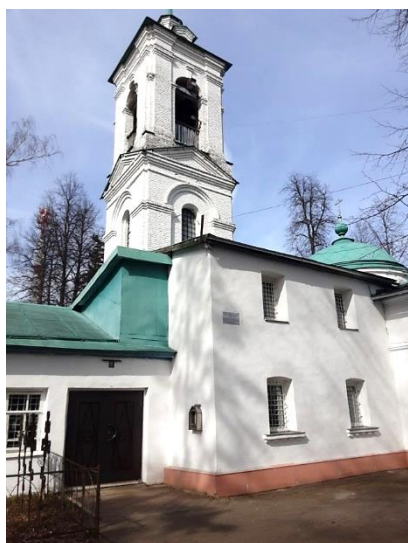


Рис. 11. Юрьевец. Церковь Святого Духа. Колокольня. Вид с южной стороны. Фото автора, 2025 г.

Fig. 11. The Church of the Holy Spirit. The bell tower, 2025. Photo by the author



Рис. 12. Церковь Сошествия Святого Духа. г. Юрьевец¹

Fig. 12. Annunciation Church of the Mountains in Yurievets

Сегодня это единственная церковь в городе, которая не была закрыта даже в советское время благодаря своему расположению на кладбище.

Успенский собор (1825–1833 гг.). Согласно «Статистическим сведениям», возведение Успенского (Нового Входаиерусалимского) собора относится к 1833 г. (рис. 13).



Рис. 13. Успенский собор. Юрьевец. Вид с юго-запада. Современное состояние²

Fig. 13. Assumption Cathedral, 2025

¹ URL: <https://sobory.ru/>

² URL: <https://sobory.ru/>

Успенский собор является монументальным сооружением с центрической композицией, возведенным в традициях позднего классицизма. В региональных исторических источниках авторство проекта связывают с губернским архитектором П.И. Фурсовым [8, с. 113].

Творения Петра Ивановича Фурсова, включая костромскую пожарную каланчу и здание гауптвахты, вошли в число выдающихся памятников русского классицизма (рис. 14).



Рис. 14. Пожарная каланча и гауптвахта. Кострома. Фото к. XIX в. Вид с северо-запада. Павловский исторический музей

Fig. 14. Fire tower and Guardhouse in Kostroma, 19th century. Pavlovsk Historical Museum

В тот же период архитектор разработал проект собора для Юрьевца (1825 г.), стилистически созвучный его предыдущим работам. Реализация этого замысла – возведение Нового Входеоерусалимского собора – была окончена в 1833 г. Подтверждением служит чертеж каменного храма 1825 г., хранящийся в Юрьевецком историко-художественном музее, который демонстрирует значительное сходство с планировочным решением Успенского собора (рис. 15).

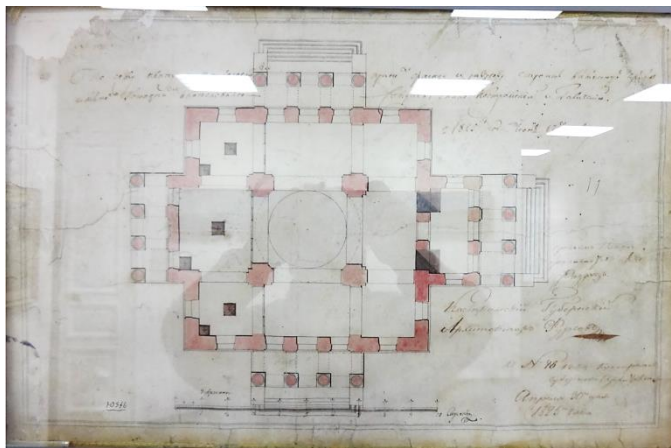


Рис. 15. План каменной церкви Успенской соборной Костромской епархии. Архитектор П.И. Фурсов, 1825 г. Юрьевецкий историко-художественный музей

Fig. 15. Plan of the stone church of the Assumption Cathedral in the Kostroma, 1825. Architect P.I. Fursov

Архитектоника и художественное оформление Успенского собора, созданного в традициях позднего классицизма, сочетают строгую монументальность с лаконичностью линий. Здание храма имеет массивный кубический объем и массивную четырехскатную кровлю, напоминающую перевернутую чашу, которая завершается миниатюрной главкой. К восточным и западным сторонам основного четверика примыкают прямоугольные в плане алтарная часть и притвор. Они разделены пилястрами и полуколоннами, увенчаны фронтонами. Северный и южный фасады акцентированы симметричными четырехколонными портиками тосканского ордера, равными по объему приделам. Крупные оконные проемы выделяются массивными наличниками с завершением полукруглых арок (рис. 16). По периметру здания проходит выразительный антаблемент, декорированный рядом небольших консолей и завершенный аттиком. Внутреннее пространство храма перекрыто полусферическим куполом, опирающимся на паруса и четыре массивных опорных столба.



Рис. 16. Юрьевец. Успенский собор. Вид с севера-востока. Фото автора, 2024 г.

Fig. 16. The Church of the Nativity, 2024. Photo by the author

Принадлежность к культовой архитектуре не помешала создателям воплотить в облике здания светскую эстетику и удивительную гармонию жизнеутверждающих форм. Известный краевед Ивановской области Л.А. Шлычков отмечает: «Требования времени и господствовавшего стиля классицизма выразились в Юрьевецком соборе с необыкновенной полнотой. Простота композиции его соединена с торжественностью форм, культовое назначение забывается благодаря светскости внешнего облика. Все это позволяет считать памятник удачным произведением зодчего, украшением Юрьевца...» [9, с. 76–78].

В прошлом Успенский собор занимал особое место в жизни города, находясь под пристальным вниманием жителей и власти. В его стенах проводились главные городские праздники, торжественные церемонии и обряды. Именно здесь приняли крещение архитекторы братья Веснины [7, с. 7]. Здание выделяется уникальными акустическими свойствами, которые считаются эталонными для культовой архитектуры. В советский период историческое здание было адаптировано под нужды времени – здесь размещался продуктовый склад. Также собор продолжал сохранять культурную значимость, став одним из первых объектов, включенных в программу реставрации Всероссийского общества охраны памятников, начатую еще в эпоху СССР. Однако в 1997 г. он был передан верующим в аварийном состоянии и в настоящее время не действует.

Георгиевская колокольня (1820–1840 гг.). Колокольня, одна из лучших в регионе с точки зрения архитектуры, выполнена в стиле позднего классицизма с элементами раннего классицизма и ампира. Юрьевецкая колокольня отличается изящной пятиярусной структурой и играет ключевую роль в формировании архитектурного облика города (рис. 17).



Рис. 17. Колокольня с церковью Георгия Победоносца. Соборная группа. 1840 г. Ивановская обл., г. Юрьевец. Входеоерусалимский собор и колокольня. Общий вид с юго-запада. Архивное фото. Государственный научно-исследовательский музей архитектуры им. А.В. Щусева

Fig. 17. The bell tower with the Church of St. George the Victorious. The Cathedral group, 1840. Ivanovo region, Yuryevets. The entrance to the Jerusalem Cathedral and the bell tower. Archival photo. Shchusev State Research Museum of Architecture

Несмотря на отсутствие точных данных об авторе проекта и дате его возведения, большинство краеведческих источников указывают на 1840 г. как время его реализации. Б.А. Владимиров отмечает: «Соборную колокольню начали строить сразу после постройки в 1833 г. Успенского собора, и, судя по архитектуре, по проекту того же замечательного костромского архитектора П.И. Фурсова. Строительство окончено в 1840 г...» [7, с. 10].

Однако сохранившиеся свидетельства, включая зарисовки братьев художников Н.Г. Чернецовых 1838 г., подтверждают, что сооружение существовало к этому времени (рис. 18). Архивные документы дополнительно проясняют историю. В «Описи церковного имущества» 1865 г. упомянуто: «Церковь святого великомученика Георгия и святого благоверного князя Георгия Всеволодовича теплая однопрестольная устроена в 1828 г.» [10]. Это позволяет предположить, что строительство велось ранее и предшествовало возведению Успенского собора. Вероятно, оба проекта создавались по единому замыслу и реализовывались параллельно.



Рис. 18. Юрьево-Повольский. Н.Г. Чернецов, 1845 г. Алупкинский дворцово-парковый музей-заповедник

Fig. 18. Yuryevets Povolsky, 1845. Painter: N. G. Chernetsov. Alupka Palace and Park Museum-Reserve

Анализируя архитектуру колокольни, Л.А. Шлычков пишет: «Высокий столп колокольни вознесся над городом, увенчав панораму его исторической части. Пять ярусов колокольни, прорезанные с четырех сторон арочными проемами, оформлены полуколоннами портиков и перекликаются через главы старого холодного, пятиглавого, Спасского собора с портиками нового теплого Успенского собора...» [11, с. 78].

Архитектурная композиция включает четыре уменьшающихся четверика и венчающую ротонду со шпилем, увенчанным крестом. Нижний ярус, где пер-

воначально размещался храм, служит массивным основанием (рис. 19). Его фасады украшены шестью колоннами, образующими портики с треугольными фронтонами. В арочных проемах между колоннами расположены окна в два яруса – полуциркульные сверху и прямоугольные снизу.

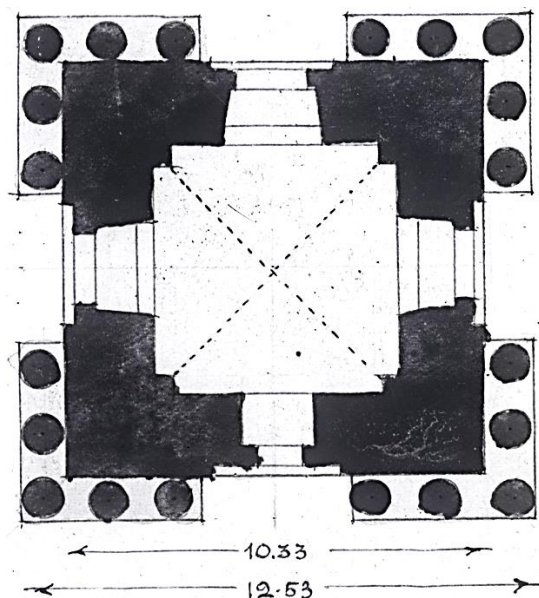


Рис. 19. Колокольня. План. Юрьевец. Фрагмент. Архитектор Н.И. Метлин, 1947 г. Государственный научно-исследовательский музей архитектуры им. А.В. Щусева

Fig. 19. Bell tower plan, Yuryevets, 1947. Architect: Metlin N.I. Shchusev State Research Museum of Architecture

Второй и третий ярусы колокольни декорированы двухколонными портиками аналогичного стиля, причем углы второго четверика акцентированы трехчетвертными колоннами. Четвертый ярус выделяется лучковыми фронтонами, а пятый, выполненный в форме ротонды, дополнен парными колоннами, поддерживающими антаблемент. Завершает композицию сферический купол с арочными окнами, люкарнами на восточной и западной сторонах. Декоративные элементы классического архитектурного ордера здесь выступают ключевым инструментом для визуального раскрытия тектонических принципов сооружения. Интерьер первого яруса разделен на два этажа, перекрытых сомкнутым сводом.

Споры об авторстве проекта остаются неразрешенными. Часть исследователей приписывает его костромскому зодчему П.И. Фурсову, однако стилистические особенности, а именно вытянутые пропорции, разорванный фронтон нижнего яруса, филенки у основания колонн, указывают на влияние раннего классицизма, что более характерно для губернского архитектора Н.И. Метлина. Ученый Н.А. Мерзлютина пишет: «Вполне вероятно, что проект юрьевецкой колокольни был разработан Н.И. Метлиным еще в 1806 г. при создании проекта перестройки Входаиерусалимского собора и с некоторыми изменениями во-

площен уже Фурсовым. Подобная история произошла со строительством Верхних торговых рядов в Галиче, спроектированных Метлиным и завершенных после его смерти Фурсовым с некоторыми переделками...» [12, с. 137]. П.И. Фурсов, завершая проект, добавил элементы ампира, включая ротонду.

Важно отметить, что в конце XVIII – первой трети XIX в. в Юрьевце наблюдался расцвет активного строительства колоколен. Были возведены звонницы Преображенского и Рождественского храмов, Богоявленской церкви в 1810 г., а также колокольня Казанская храма в 1820 г. [13]. Однако все постройки были утрачены, и лишь юрьевецкая колокольня избежала разрушения в 1920-е гг. Несмотря на ее утилитарное использование в советский период (на верхнем ярусе располагался пост пожарной сигнализации), высота и расположение сделали ее ключевой доминантой города, формируя панораму его исторического центра.

Заключение

Подводя итоги исследования объектов церковной архитектуры малого исторического города Юрьевца, созданных на рубеже XVIII – первой половины XIX в., можно отметить, что стиль классицизм, получивший воплощение в архитектурных памятниках города, отразил элементы государственной стратегии Российской империи, нацеленной на централизацию и культурную унификацию.

Формирование единого архитектурного стиля в историческом городе стало возможным благодаря системной работе зодчих и контролю над проектированием. Это позволило сформировать основу архитектурного языка, символизировавшего мощь имперской власти. В отличие от барокко, характеризовавшегося региональным разнообразием местных школ и сложным декором, классицизм предлагал экономичные и стандартизированные решения, становясь визуальным выражением имперской идентичности и подавляя локальные особенности.

Для классицистической архитектуры Юрьевца в целом не характерно отражение каких-либо специфических свойств и приемов местной архитектурно-строительной и архитектурно-художественной практики, что подчеркивает роль централизованного влияния в формировании облика города.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеева А.Ю. Ретроспективный архитектурно-градостроительный анализ развития исторического города Юрьевца на рубеже XVII–XVIII вв. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 5. С. 71–83. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-71-83. EDN: EKCUN
2. Беляев И. Статистическое описание соборов и церквей Костромской епархии, сост. на основании подлинных сведений, имеющихся по Духовному ведомству, членом Костромского губернского статистического комитета, Кафедрального Успенского собора протоиреем Иоанном Беляевым. Санкт-Петербург : Тип. Почт. Департамента, 1863. 358 с.
3. Юрьевец. Петропавловская церковь, 1806 г. // Известия Археологической Комиссии. Вып. 31 (Вопросы реставрации. Вып. 3). Санкт-Петербург, 1909. 323 с.
4. Ведомости церковно-служащих ведомства Юрьевецкого духовного правления. 1819 // Государственный архив Ивановской области (ГАИО). Ф. 907. Оп. 1. Д. 907. Л. 10–10 об.; 13–13 об.

5. Виноградов Н.Н. Материалы по истории, археологии, этнографии и статистике Костромской губернии. Кострома : Костромская губ. типография, 1912–1915. Вып. 1: Писцовая и межевая книги по городу Юрьевцу Поволжскому и Стрелецкой слободе 7184 (1676) года. 1912. III, 282, II с.
6. Свод памятников архитектуры и монументального искусства России: Ивановская область. Часть 3 / под ред. Е.Г. Щеболева. Москва : Наука, 2000. 813 с.
7. Владимиров Б.А. Храмы моего города. С. 1–37.
8. Полякова Л.Л. Юрьевец: Историко-краеведческий очерк. Ярославль : Верх.-Волж. кн. изд-во, 1984. 144 с.
9. Полякова Л.Л., Шлычков Л.А. Красные архитекторы Веснины // Юрьевец : путеводитель. Ярославль : Верхне-Волжское книжное изд-во, 1975. 160 с.
10. Опись церковному имуществу Костромской Епархии Юрьевецкого Спасовходенского собора в 1865 г. // Российский государственный исторический архив (РГИА). Ф. 834. О. 3. Д. 2717. Л. 79 об., 19 об.
11. Шлычков Л.А. Листая времени страницы. Памятники архитектуры Ивановской области. Ярославль : Верх.-Волж. кн. изд-во, 1983. 159 с.
12. Мерзлютина Н.А. Соборный ансамбль города Юрьевца // Архитектурное наследство. Вып. 56. Москва, 2012. С. 129–140. EDN: PASNHL
13. Алексеева А.Ю. Архитектурно-стилистический анализ культовых объектов малого исторического города Юрьевец рубежа XVIII–XIX вв. Часть 1 // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 2. С. 95–114. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-95-114. EDN: XTLCDU

REFERENCES

1. Alekseeva A.Yu. Retrospective Town-Planning Analysis of Yuryevets Historical Development at the Turn of 18th Century. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (5): 71–83. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-71-83. EDN: EKCUUN (In Russian)
2. Belyaev I. Statistical Description of Cathedrals and Churches of the Kostroma Diocese. Saint-Petersburg, 1863. 358 p. (In Russian)
3. Peter and Paul Church in Yuryevets, 1806. *Izvestiya Arkheologicheskoi Komissii*. 1909; (31): 323. (In Russian)
4. State Archive. Form 907, list 1, record 907; list 10-10, list 13-13. (In Russian)
5. Vinogradov N.N. Materials on the History, Archeology, Ethnography and Statistics of Kostroma province. Kostroma, 1912–1915. In: Issue 1: Scribal and boundary books about Yuryevets Povolzsky and Streletskaya sloboda 7184 (1676). 1912. (In Russian)
6. Shchebolev E.G. (Ed.) The code of Monuments of Architecture and Monumental Art of Russia. Moscow: Nauka, 2000. 813 p. (In Russian)
7. Vladimirov B.A. Temples of My City. Pp. 1–37. (In Russian)
8. Polyakova L.L. Yuryevets: A Historical and Local History Essay. Yaroslavl: Verh.-Volzhsky Publishing House, 1984. 144 p. (In Russian)
9. Polyakova, L.L., Shlychkov L.A. The Red Architects of Vesnina. Yaroslavl: Verkhne-Volzhsky Izd., 1975. 160 p. (In Russian)
10. Regional Archive. Form 834, list 3, record 2717. Inventory of church property of the Kostroma Diocese of the Yuryevetsky Spasovhodensky Cathedral in 1865. (In Russian)
11. Shlychkov L.A. Flipping through the Time Pages. Architectural Monuments of the Ivanovo region. Yaroslavl: Verkhne-Volzhsky Izd., 1983/159 p. (In Russian)
12. Merzlyutina N.A. The Cathedral Ensemble in Yuryevets. *Arkhiturnoe nasledstvo*. 2012; (56): 129–140. (In Russian)
13. Alekseeva A.Yu. Architectural and Stylistic Analysis of Cult Sites in Small Historical Town Yuryevets at the Turn of the 18–19th Centuries. Part 1. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (2): 95–114. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-95-114. EDN: XTLCDU

Сведения об авторе

Алексеева Анна Юрьевна, аспирант, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, 630099, г. Новосибирск, Красный пр., 38, annpetuhova@mail.ru

Author Details

Anna Yu. Alekseeva, Research Assistant, Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, annpetuhova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2025
Одобрена после рецензирования 27.05.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 20.05.2025
Approved after review 27.05.2025
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 40–53.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 40–53.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 725.4:629.7:678.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-40-53

EDN: CQDYZC

АРХИТЕКТУРА ЛУННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ

Елена Владимировна Малая

Московский архитектурный институт (государственная академия)

Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана

АО «ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия

Аннотация. Тысячелетиями человек стремится в космическую бесконечность, создавая фантастические произведения, посвящённые освоению просторов Вселенной. Однако только в начале XXI в., благодаря технологическому прогрессу и активной деятельности космических держав, мы можем создавать реальные и вполне осуществимые проекты космических поселений, с надеждой глядя в настоящее и будущее. Современные планы по созданию лунных и марсианских поселений требуют научного обоснования и архитектурно-инженерных решений, обеспечивающих безопасность, комфорт и устойчивость жизнедеятельности человека в экстремальных условиях. Начало строительства возможно с помощью роботизированной техники.

Цель. Основная цель исследования заключается в разработке проекта лунного поселения, способного обеспечить максимально комфортные условия для длительного проживания и работы исследователей на поверхности Луны.

Результаты. Представлен анализ современных проектов освоения Луны и предложено проектное решение, включающее эскизный проект лунной базы, демонстрирующее возможность поэтапного освоения Луны с учётом современных технологий и требований безопасности.

Ключевые слова: лунное поселение, строительство на поверхности Луны, поселение в лунной лавовой трубке, лунный лифт, комфортные условия в лунном поселении, жизнеобеспечение, роботизированное строительство

Для цитирования: Малая Е.В. Архитектура лунных поселений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 40–53. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-40-53. EDN: CQDYZC

ORIGINAL ARTICLE

ARCHITECTURE OF LUNAR SETTLEMENTS

Elena V. Malaya

Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

AO "TSNIIpromzdaniy", Moscow, Russia

Abstract. For thousands of years, people have been striving for cosmic infinity, creating fantastic works dedicated to exploration of the vast universe, but only now, at the beginning of the

21st century, we can design real and quite feasible space settlement projects with hope looking to the present and the future. Today, space powers resume the lunar race and plan to explore the Moon and Mars in the very near future, placing settlements on their surface. It is planned to start construction with the help of robotic technology, subsequently developing the possibility of a long-term human stay on the surface of the Moon and Mars, providing researchers with complete safety and reliable life support system.

Purpose: The main purpose of the study is to develop a lunar settlement project that can provide the most comfortable conditions for long-term living and work for researchers on the lunar surface.

Methodology: The analysis of modern lunar exploration projects.

Research findings: The proposed design solution includes a preliminary design of a lunar base, demonstrating the possibility of gradual lunar exploration based on modern technologies and safety requirements.

Keywords: lunar settlement, moon surface, lunar lava tube, lunar elevator, comfortable conditions, life support, robotic construction

For citation: Malaya E.V. Architecture of Lunar Settlements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 40–53. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-40-53. EDN: CQDYZC

Введение

Новое направление в архитектуре будущего – космическая архитектура – является сложной системой развития уникальной гармонии древнего и классического понимания искусства создания пространств в единстве с современными инженерными решениями, IT-индустрией и инновационными технологиями. Тысячи лет человечество формировало свои знания о теории архитектуры, оттачивая каждый элемент её уникального языка в совершенное понимание пространства для человека как частицы бесконечной Вселенной. Космическая архитектура будущего начала своё интенсивное развитие более 150 лет назад в произведениях русских космистов, учёных и писателей, а спустя время – в создании летательных аппаратов и проектов будущих поселений. Стремительное развитие нового направления в архитектуре порождает интересные проектные предложения с уникальными инженерными решениями, способными сохранить возможность длительного пребывания человека в самых отдалённых уголках Солнечной системы. Уникальные проекты дают надежду на возможность существования в сложных условиях других планет. Однако это не только колонизация для освоения полезных ископаемых, а широкомасштабная научно-исследовательская работа, способная повернуть человечество к более цивилизованному существованию [2, 3].

В современном научном мире Луна является наиболее привлекательным объектом для освоения, научных исследований и строительства поселений [5, 6]. Пока для человечества это самое близкое и доступное космическое тело (расстояние около 384 000 км и время для полёта может занимать около трёх дней). В случае создания лунного лифта или другой возможности быстрее преодолеть это расстояние поверхность Луны станет совершенно доступной для землян¹. При

¹ Докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИНАСАН РАН и АО «НПО Лавочкина» А.В. Банров, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИНАСАН РАН В.А. Леонов с коллегами предложили самый со-

этом подобное поселение поможет решить целый ряд научных задач, стоящих сейчас перед человечеством. В первую очередь это вопросы добычи полезных ископаемых, пока люди не научились добывать в достаточном количестве энергию из возобновляемых источников.

Предполагается, что постоянная лунная база станет местом для размещения обсерваторий, биологических лабораторий и зимних садов для выращивания овощей и фруктов, способных обеспечить космонавтов продуктами питания в период длительного проживания и дальних полётов, кормить космических туристов и многое другое. Исследование лунной коры, недр спутника и истории его развития поможет в изучении истории Земли. Лунные поселения позволят следить за спутниками, метеорологической ситуацией, предупреждать катастрофы и многое другое. Лунные обсерватории позволят проводить исследования, недоступные астрономам на Земле из-за наличия атмосферы, появится возможность изучения всей солнечной системы [5]. В структуру лунных поселений могут быть включены центры подготовки космонавтов к дальним полётам, рассчитанным на длительный период времени. При этом отработка новых технологий на поверхности Луны поможет избежать многих потерь по сравнению с земными испытаниями. Проектные и конкурсные работы по созданию поселения на Луне демонстрируют желание почти всех архитекторов создать наиболее комфортные условия с большим количеством зелёных насаждений [7].

Основной целью настоящего исследования является создание проекта лунного поселения, обеспечивающего максимально комфортные условия проживания и работы исследователям на длительное время. Достижение поставленной цели возможно при выполнении соответствующих задач, направленных на изучение основных вопросов, связанных с проектированием зданий и инженерных сооружений на поверхности Луны.

Для более эффективного научного освоения планеты необходим международный коллектив учёных, заинтересованных в мирном освоении Космоса. Кроме того, требуется принципиально новый план согласованных действий всех научных центров с выработкой общей стратегии развития космических исследований на ближайшие сто и более лет, поиск новых технологий и успешный прорыв в будущее. Более 150 лет назад Н.Ф. Федоров писал о космическом будущем человечества. Чуть позже К.Э. Циолковский уже планирует будущие «эфирные поселения» в пространстве Вселенной, оснащённые оранжереями, научными лабораториями, инженерными сооружениями и жильём [1]. В настоящее время существует множество архитектурных проектов, отражающих в полной мере пожелания человечества в создании комфортных научно-исследовательских баз на Луне, Марсе и других планетах [4]. Развитие космической архитектуры стремительно движется вперёд, включая в свои структуры все направления деятельности современной науки.

Основная сложность реализации проектов по строительству базы на поверхности Луны предопределена экстремальными условиями, представляющими угрозу для жизни человека: отсутствие атмосферы и гравитации, наличие

метеоритных атак, губительный для человека высокий радиоактивный фон, необычайно резкие перепады температуры (от $+160$ до -180 °C), отсутствие естественных источников воды, пищи и постоянных источников возобновляемой энергии, особенно в период лунной ночи. Все это осложняет обеспечение необходимых потребностей. Однако проекты лунных и марсианских поселений активно разрабатываются научным сообществом. Важным направлением начала работы является выбор места строительства будущего поселения. Предпочтение отдаётся территориям, расположенным вблизи полюсов Луны, где были обнаружены запасы льда. Данный ресурс может быть использован для обеспечения поселенцев технической, а в перспективе – и питьевой водой на многие десятилетия. Важным аспектом является использование лёгких и надёжных строительных материалов, таких как надувные утврждаемые конструкции, которые успешно применяются во многих областях человеческой деятельности [12].

Краткий обзор существующих проектов

Более 60 лет в научном мире идут разработки технологий, позволяющих создать поселения или научно-исследовательские базы на Луне, рассматриваются варианты создания научно-исследовательских баз с последующим строительством поселений [8]. Один из первых успешных, но не осуществлённых проектов лунного поселения был создан под руководством В.П. Бармина, в котором достаточно полно разработаны капсулы для проживания и система жизнеобеспечения (рис. 1).

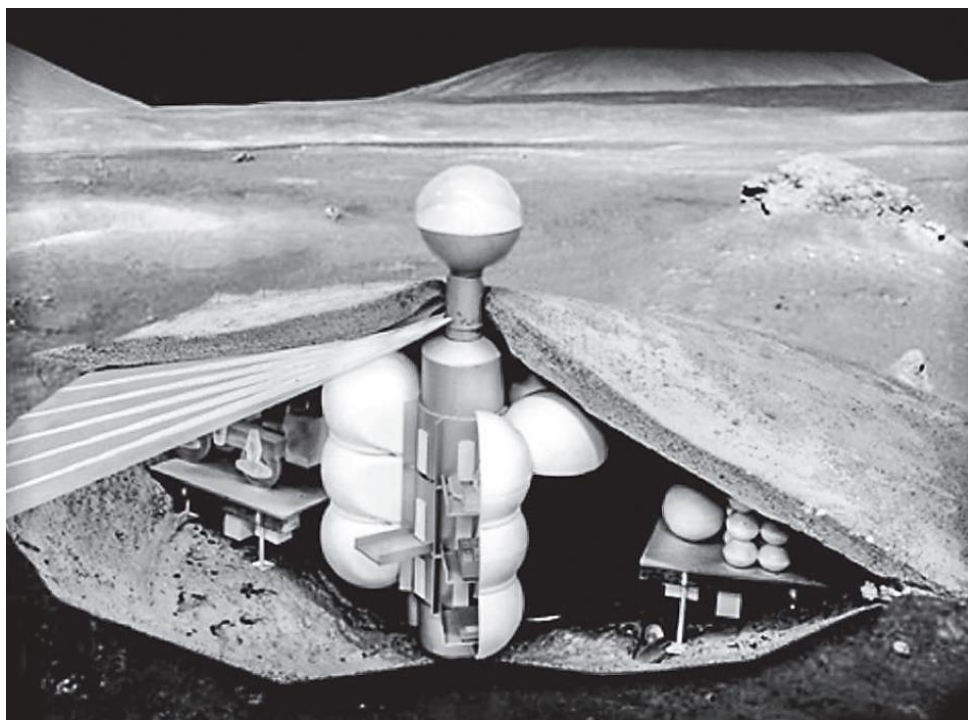


Рис. 1. Часть проекта лунного поселения «Барминград» [8]
Fig. 1. Lunar settlement “Barmingrad” project

В последние годы разрабатываются интересные проекты лунных баз. Один из наиболее известных создан компанией Foster + Partners и ЕКА. Он предназначен для проживания 3–4 человек (рис. 2). В этом проекте надувной купол покрывается слоем лунного грунта, скреплённым особым связующим раствором. Специальные световые проёмы с защитой от радиации обеспечивают естественное освещение помещений².



Рис. 2. Проект лунной деревни архитектурного бюро Foster + Partners и ЕКА³
Fig. 2. Lunar village from the Foster + Partners and European Space Agency

Победителем международного конкурса 2016–2017 гг. стал проект автономного лунного поселения под названием Moontopia, представляющий собой комплекс снежных коконов (рис. 3). В рамках проекта предпринята попытка создания жилых и общественных модулей на поверхности Луны, которые способны обеспечить исследователей всем необходимым с соблюдением требований безопасности. С художественной точки зрения проект выделяется своей привлекательностью, а использование инновационных строительных материалов позволяет организовать эффективную защиту от воздействия радиации. Однако сохраняется проблема защиты зданий от метеоритных дождей.

Среди современных проектных предложений создания поселения на поверхности Луны много интересных инновационных решений, включающих использование надувных конструкций или строительство из местного базальта [10]. Несмотря на научную значимость и оригинальность, все проектные разработки, проводимые каждой страной в отдельности, остаются на стадии теоретических исследований, и финансирование подобного строительства вызывает

² Лунная база. Европейское космическое агентство: официальный сайт. URL: <https://www.esa.int/research?q=moon+base/>

³ URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/01/Lunar_base_made_with_3D_printing

много вопросов. Создание полноценной научно-исследовательской базы на Луне требует объединения усилий нескольких космических держав.

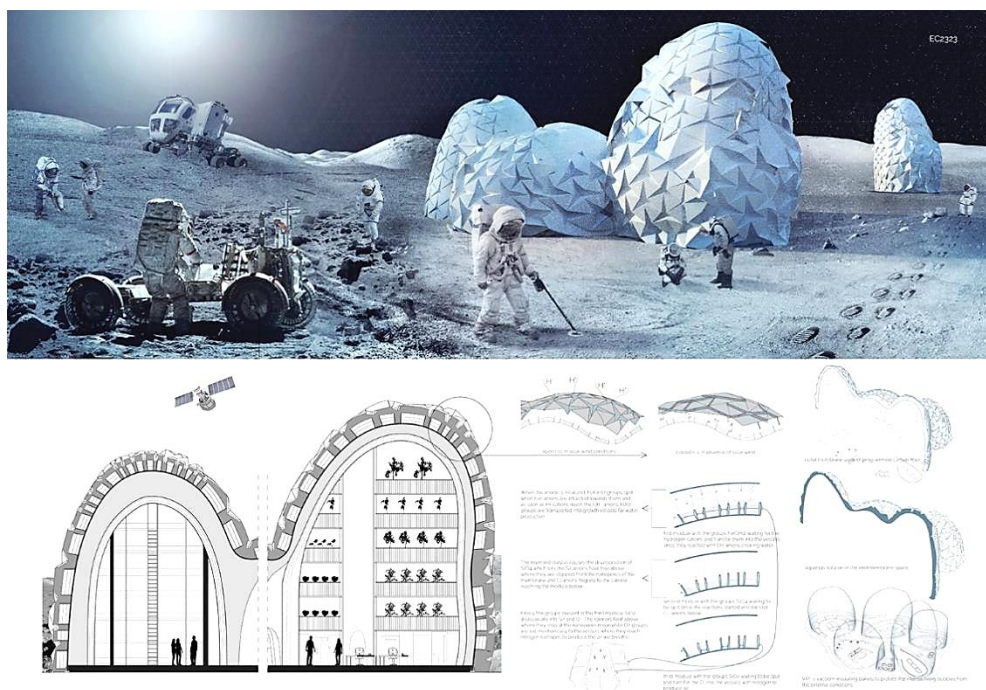


Рис. 3. Проект лунного поселения Moontopia⁴
Fig. 3. Moontopia lunar settlement project

Проектное предложение лунного поселения

Ниже представлены проектные предложения по созданию лунного поселения, разработанные архитекторами МАРХИ при участии и консультации специалистов АО «НПО Лавочкина», Института астрономии РАН. Основным примером служит выпускная работа магистра С.А. Аликовой, выполненная под научным руководством кандидата архитектуры Е.В. Малая с привлечением научных консультантов: доктора технических наук, начальника отдела научно-исследовательских работ и перспективных исследований АО «НПО Лавочкина» В.К. Сысоева; ведущего инженера АО «НПО Лавочкина» Д.С. Хмель; а также кандидата физико-математических наук, научного сотрудника Института астрономии Российской академии наук ИНАСАН В.А. Леонова (2024 г.).

Проект предусматривает долгосрочную стратегию строительства, разделённую на четыре последовательных этапа:

I этап – работы по расчистке и обеспыливанию территории на поверхности Луны с использованием роботов-луноходов для размещения всего поселе-

⁴ URL: <https://tehne.com/event/arhivsyachina/nekotorye-voprosy-obemno-prostranstvennogo-resheniya-sooruzheniy-na-lune-1967?ysclid=lyk7cj04s776265497>

ния, строительство базы на 3–5 человек и сооружений инженерного обеспечения будущего поселения.

II этап – строительство жилых и рабочих модулей для 5–6 человек с возможностью проживания в течение 1–3 месяцев.

III этап – строительство жилых и общественных помещений, рассчитанных на размещение 20–30 человек, способных находиться в поселении до одного года.

IV этап – строительство поселения на 100 и более человек, создание научно-исследовательской базы, туристического центра, завода по переработке полезных минералов.

В представленном проекте выбрано размещение поселения внутри лавовой трубки. Это позволит создать условия, необходимые для обеспечения физической и психологической защиты человека от экстремальных условий лунной среды. Сохранение творческих способностей и психологического комфорта каждого жителя поселения является обязательным условием разработки проектного решения.

Физическая безопасность поселенцев почти полностью обеспечивается выбором места расположения зданий и сооружений. Наиболее экономичным и безопасным вариантом считается строительство внутри лавовой трубки, достаточно просторной и полностью защищающей от падения метеоритов, резких колебаний температур и смертельного радиационного воздействия. Для обеспечения эвакуации предусмотрено три варианта размещения входов и выходов в жилые и рабочие помещения:

- выезд/въезд в поселение с поверхности Луны по организованной магистрали;
- подъём и спуск на лифте к поверхности планеты в случае необходимости;
- вход/выход и полет на летательных аппаратах, рассчитанных на 1–2 пассажира.

Обеспечение психологической безопасности представляет собой более сложную задачу. Она включает соблюдение принципов пропорционирования, световых и цветовых соотношений материалов и многое другое. Под психологической безопасностью и возможностью сохранения у исследователей творческого потенциала подразумевается создание условий, благодаря которым человек будет чувствовать себя свободным, спокойным и развивающимся. Это крайне важно в условиях экстремальной среды, где опасные ситуации подразумевают возможность принятия неординарных решений, не предусмотренных программой подготовки космонавтов. Творческие и свободные в выборе люди легче принимают сложные решения и адаптируются к таким условиям.

Схематичный разрез лавовой трубки и размещённого в ней поселения демонстрирует расположение жилых и общественных помещений, объединённых автодорогой на одном уровне. Идея расположения зданий на разных уровнях обусловлена необходимостью максимально сократить работы по очистке территории для строительства, поэтому каждый модуль размещён на небольшом плато и связан с единой транспортной системой поселения посредством связей, переходов и пандусов, образующих общую структуру (рис. 4).

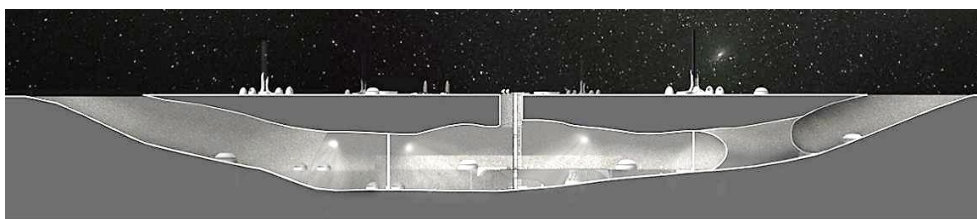


Рис. 4. Схематический разрез размещения лунного поселения в лавовой трубке. На поверхности Луны размещаются инженерные сооружения, космодром и выходы из лифтов, соединённые лунным лифтом. Автор С.А. Аликова

Fig. 4. Schematic section of lunar settlement in a lava tube. Engineering structures, spaceport, elevator exits, and connection to the lunar elevator on the Moon surface. Created by S.A. Alikova

Процесс строительства поселения начинается работой роботов-луноходов и предусматривает в первую очередь расчистку площадок под модули, выравнивание поверхности будущей транспортной артерии, способной связать все здания и сооружения будущего поселения по намеченному генеральному плану. Основание под каждое сооружение должно быть расчищено как некий подиум с максимально ровной горизонтальной поверхностью. Поскольку все здания и сооружения будут находиться на разной высоте, транспортные связи и возможность подъезда к каждому сооружению осуществляются по индивидуальному плану и на разных уровнях. Для въезда в каждое отдельно стоящее здание с уровня магистрали предусмотрена возможность въезда по пандусу или в подвальное и полуподвальное помещение, на первый или второй этаж. Возможности передвижения роботов-луноходов позволяют им преодолевать различные наклонные и сложно проходимые участки, поэтому основная часть дороги очищается от перепадов высот и глубоких впадин (рис. 5).

На следующем этапе строительства жилых, общественных и рабочих модулей предлагается использовать купол или полусферу, как наиболее простую для производства надувных лёгких конструкций и совершенную геометрическую форму. Кроме того, эта форма характеризуется высоким уровнем психологического комфорта для человека. Материалом для строительства служат надувные утврждаемые купола, разработанные специалистами НПО Лавочкина, как проектное предложение для создания научных летательных аппаратов для исследования Венеры и Луны. Эти конструкции успешно применяются в экстремальных космических условиях [12]. Выбор данного метода строительства на поверхности Луны обусловлен возможностью доставки таких модулей без использования тяжёлых ракет-носителей. Куполообразные модули изготавливаются из достаточно плотного материала, не пропускающего лунную пыль, однако их применение связано с рядом недостатков, решение которых остаётся предметом исследований.

Каждый модуль обладает уникальными габаритами и архитектурно-художественным решением, основанным на цвете и форме оконных проёмов, вернее, прозрачной части купола. Это позволяет сохранять функциональные особенности каждого модуля и обеспечить уникальный внешний облик поселения. Так, общественные модули, где располагаются библиотеки, гостиные, места от-

дыха и развлечения, становятся более крупными и 2–4-ярусными. Галереи с зимними садами и зонами для выращивания продуктов представлены в виде нескольких куполов, связанных между собой переходами.

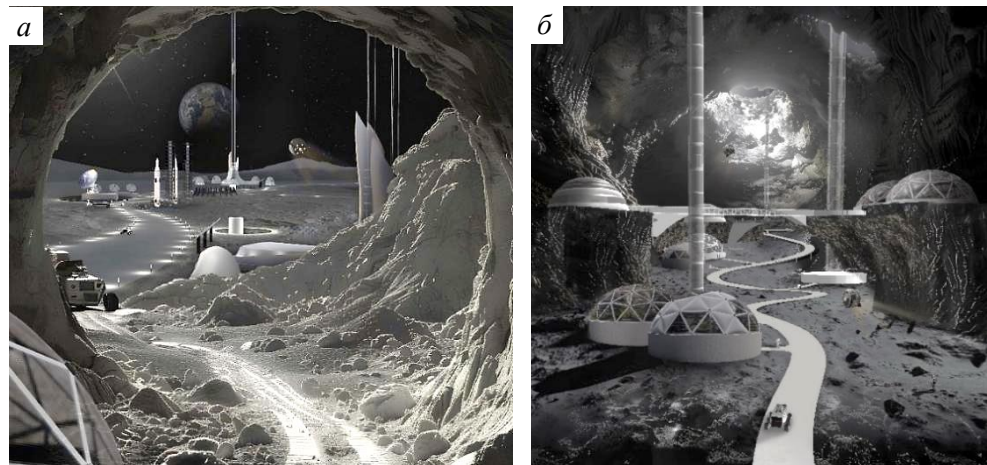


Рис. 5. Лунное поселение в лавовой трубке. Автор С.А. Аликова:

а – въезд/выезд в поселение с видом на инфраструктуру, обеспечивающую жизнь и работу поселенцев; *б* – вид транспортной магистрали поселения и лифтов для передвижения/эвакуации населения

Fig. 5. Lunar settlement in a lava tube:

a – entrance/exit to the settlement with a view of the infrastructure that ensures life and work of the settlers; *b* – highway and elevators for movement/evacuation of the population. Created by S.A. Alikova

Форма полусферы позволяет создавать в интерьере многоуровневое пространство с пандусами и лифтами, при этом появляется интересная и важная для зрительного восприятия архитектурная форма с игрой света и тени, способствующая формированию благоприятной атмосферы внутри помещений. Ещё один важный элемент для поддержания психологического комфорта жителей поселения – наличие зелёных и цветущих растений, равномерное распределение давления и циркуляция воздуха, создание благоприятного микроклимата (это предмет рассмотрения отдельной статьи, в данной работе указана лишь незначительная часть информации о многочисленных медико-биологических исследованиях). В 1962 г. Сергей Павлович Королев перед своим коллективом поставил задачу создания «космических оранжерей по Циолковскому».

На рис. 6 представлена последовательность этапов строительства одного из куполов. С помощью 3D-печати создаётся крепкое основание – своеобразный фундамент. На нем принтер наращивает конструктивную основу для купола из расплавленного реголита [6]. Затем конструкция покрывается тканью с её последующим отведением и созданием внутри полусферы пространства для жизни, работы и отдыха [9, 11]. Устройство купольных сооружений в лавовой трубке позволит сформировать своеобразный архитектурно-художественный облик, в котором могут присутствовать разные цвета

куполов и художественная подсветка. Это придаст более живописный вид лунному поселению. После строительства сооружений создаются интерьеры в соответствии с функциональным назначением каждого купола в отдельности [7, 9, 11].

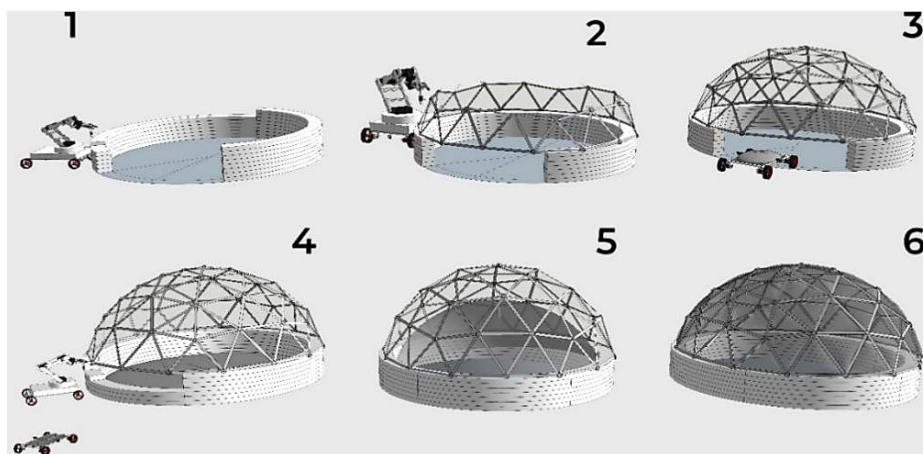


Рис. 6. Схема этапов строительства купольных модулей. Автор С.А. Аликова
Fig. 6. Construction stages of dome modules. Created by S.A. Alikova

На рис. 7 показаны схематические разрезы куполов разного функционального назначения, включающие по три уровня:

- теплицы для выращивания продуктов;
- оранжереи для отдыха и психологической нагрузки, где выращиваются ягодные культуры, цветы и деревья, разбит своеобразный сад и парк;
- под куполом собраны лаборатории и научно-экспериментальные помещения.

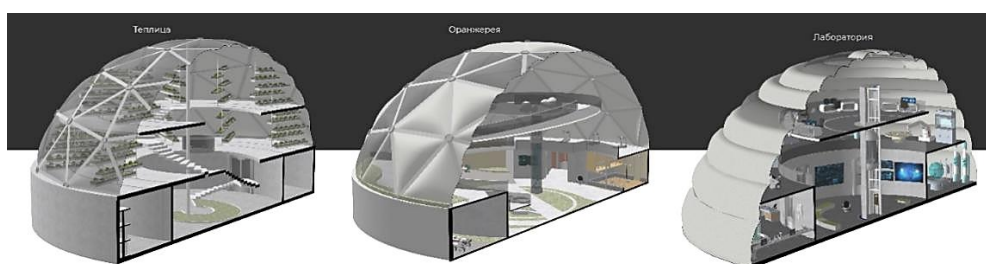


Рис. 7. Схематические разрезы сооружений, демонстрирующие их функциональное назначение. Автор С.А. Аликова
Fig. 7. Schematic of structures demonstrating their functionality. Created by S.A. Alikova

Все здания характеризуются разной планировочной структурой, разработанной для максимального удобства использования помещений. Так, интерьер оранжереи не делится на этажи, а перемещение происходит по пандусу, что создаёт ощущение свободы и позволяет любоваться цветущими деревьями. По-

добные концепции давно разрабатываются и популяризуются космическими агентствами⁵.

На рис. 8 представлен схематический разрез жилого пространства, разделённого на четыре яруса, каждый из которых выполняет определённую функцию. Нижний уровень отведён под спальные помещения, следующий предназначен для зоны тренажёров, необходимых для поддержания здоровья исследователей. Выше расположены зоны отдыха и общения. Все уровни соединяются вертикальной связью в виде ажурной конструкции и лифтом-подъёмником внутри, обеспечивающим доступ ко всем четырём уровням. Дополнительным объединяющим фактором является второй свет между всеми уровнями, включая уровень, в котором размещены высокие деревья и растения.



Рис. 8. Схематический разрез жилого пространства с зелеными насаждениями и вторым светом. Автор С.А. Аликова

Fig. 8. Schematic of living space with green area and second light. Created by S.A. Alikova

Архитектурным проектом предусматривается три варианта перемещения и эвакуации исследователей:

- подняться либо спуститься на поверхность планеты можно с помощью лифтов, которые объединяют несколько окружающих его куполов;
- применение небольших летательных аппаратов, рассчитанных на 1–2 человек;
- перемещения на луноходах и других вездеходах, способных работать на автомагистрали в лавовой трубке и на поверхности Луны в дневное время лунных суток.

Снижение чувства замкнутости и сдавленности в пространстве поселения обеспечивается свободной планировкой и размещением куполов на разной высоте. Такое решение обеспечивает экономию ресурсов при подготовке поверхности к строительству и создание более живой панорамы при восприятии архитектуры с разных точек. При этом необходимо соблюдать определённые размеры помещений, достаточные для того, чтобы у каждого жителя космического поселения сохранялась возможность обозревать пространство. Для сохранения здоровья человеку важно иметь возможность созерцать красоту, видеть цветущие растения внутри жилых и общественных пространств, где деревья могут достигать пяти и более метров в высоту. При передвижении на летательном аппарате или луноходе по лавовой трубке перед человеком будет открываться живописная панорама лунного поселения (рис. 9).

⁵ URL: https://dzen.ru/a/Zy7vi2wZKQ6_-nev?ysclid=mam3s07vpa225274130

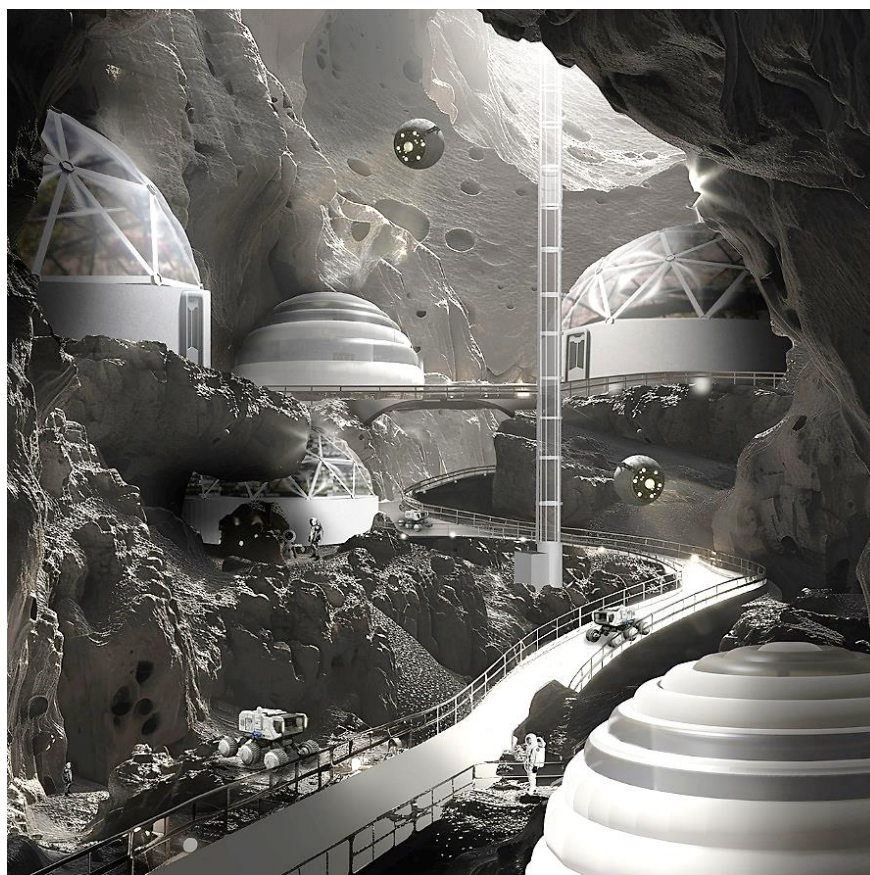


Рис. 9. Общая панорама поселения в лавовой трубке. Автор С.А. Аликова

Fig. 9. General view of the settlement in the lava tube. Created by S.A. Alikova

Несомненно, панорама лунного поселения должна обладать положительным архитектурно-художественным обликом, сомасштабным человеку. Кроме того, важна возможность обзора всего поселения с разных точек. Освещение поселения внутри лавовой трубки создаётся благодаря правильному расположению осветительных приборов тёплого света, ореол освещения которого захватывает максимально большую площадь.

Заключение

Эскизный проект лунной базы, представленный в статье, является частью научно-исследовательской и проектной работы, объединившей специалистов космической отрасли и архитекторов. Проектирование и строительство лунных исследовательских баз, а в перспективе – полноценных поселений должны быть максимально эффективными, безопасными и экономически целесообразными. Поэтому проектные предложения разрабатываются на протяжении несколько лет, что позволяет выявить наиболее оптимальное решение для реализации.

Разработка подобных проектов воплощает в жизнь архитектурные и научные идеи и создаёт основу для проведения экспериментов, научных ис-

следований и освоения полезных ресурсов Луны. Транзитные станции для космических аппаратов, предназначенные для дозаправки топливом и отдыха экипажей, становятся все более реалистичной перспективой для осуществления полётов в другие галактики.

Представленный проект даёт возможность размещения поселения в лавовой трубке, где существует наиболее удачная естественная защита от метеоритов, экстремальных перепадов температур и воздействия солнечной радиации. Автономная система жизнеобеспечения позволяет использовать возобновляемые источники энергии и основана на принципах безотходного производства, что определяет безопасность и экологическую устойчивость проекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Алексеева В.И.* Богатство научно-технической мысли К.Э. Циолковского // Государственный музей истории космонавтики им. К.Э. Циолковского. URL: <https://gmik.ru/2017/09/12/bogatstvo-nauchno-tehnicheskoy-mysli-k-e-tsiolkovskogo/> (дата обращения: 05.03.2025).
2. *Багров А.В., Леонов В.А.* Проблемы перехода от исследования Луны к ее освоению // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 3 (104). С. 22–33. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-104-3-22-33. EDN: IBNJUF
3. *Багров А.В., Нестерин И.М., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К., Сысоев А.К., Юдин А.Д.* Анализ методов строительства конструкций лунных станций // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 4. С. 75–80.
4. *Красносельский С.А.* Запасная планета. Москва : Издатель И.В. Балабанов, 2004. 350 с.
5. *Леонов В.А.* Постоянная лунная станция как приоритет России в освоении ресурсов космоса // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4 (109). С. 56–67. DOI: 10.30981/2587-7992-2021-109-4-56-67. EDN: ZCAYTR
6. *Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы* / под ред. В.П. Легостаева, В.А. Лопоты. Москва : РКК «Энергия», 2011. 584 с. ISBN 978-5-91820-046-9.
7. *Малая Е.В., Галеев С.А., Нечаев А.Л., Леонов В.А.* Многофункциональные поселения на Луне в экспериментальных проектах МАрХИ // Техническая эстетика и дизайн-исследования. 2020. Т. 2. № 4. С. 23–32. DOI: 10.34031/2687-0878-2020-2-4-23-32. EDN: DOEGYR
8. *Мержанов А.И.* Лунная база «Барминград». Проект, опередивший время // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 2 (95). С. 107–117. DOI: 10.30981/2587-7992-2018-95-2-107-117
9. *Сизенцев А.Г., Шевченко В.В., Семенов В.Ф., Байдал Г.М.* Концепция производственной лунной базы 2050 // Вселенная и мы. 1997. № 3. С. 62–71.
10. *Шевченко В.В.* Лунная база. Москва : Знание, 1991. 64 с.
11. *Котляров Е.Ю., Малая Е.В., Сысоев В.К., Хмель Д.С., Юдин А.Д.* Концепция защитных трансформируемых конструкций для луноходов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 12 (156). С. 1–16. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-12-2408. EDN: CIMSUY
12. *Хмель Д.С.* Надувные отверждаемые конструкции в космосе // К.Э. Циолковский и прогресс науки и техники в XXI веке : материалы 56-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть 2, Калуга, 21–23 сентября 2021 г. Калуга : ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»), 2021. С. 82–85.

REFERENCES

1. *Alekseeva V.I.* The wealth of scientific and technical thought of K.E. Tsiolkovsky. Available: <https://gmik.ru/2017/09/12/bogatstvo-nauchno-tehnicheskoy-mysli-k-e-tsiolkovskogo/> (In Russian)
2. *Bagrov A.V., Leonov V.A.* Problems of Transition from the Moon Investigation to its Exploration. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*. 2020; 3 (104). (In Russian)
3. *Bagrov A.V., Nesterin I.M., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K., Sysoev A.K., Yudin A.D.* Analysis of Construction Methods of Lunar Stations. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2014; (4): 75–80. (In Russian)
4. *Krasnoselsky S.A.* Reserve Planet. Moscow: Publisher I.V. Balabanov, 2004. 350 p. (In Russian)

5. Leonov V.A. Permanent Lunar Station as Russia's Priority in Space Exploration. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*. 2021; 4 (109): 56–67. (In Russian)
6. Legostaev V.P., Lopota V.A. (Eds.) The Moon is a Step Towards Technologies for Exploring the Solar System. Moscow: Energia, 2011. 584 p. (In Russian)
7. Malaya E.V., Galeev S.A., Nechaev A.L., Leonov V.A. Multifunctional Settlements on the Moon in Experimental MARCHI Projects. *Tekhnicheskaya ehstetika i dizain-issledovaniya*. 2020; 2 (4): 23–32 (In Russian)
8. Merzhanov A.I. Lunar Base "Barmingrad". *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*. 2018; 2 (95): 107–117. (In Russian)
9. Sizentsev A.G., Shevchenko V.V., Semenov V.F., Baydal G.M. The Concept of a Production Lunar Base 2050. *Vseennaya i my*. 1997; (3): 62–71. (In Russian)
10. Shevchenko V.V. The Lunar Base. Moscow: Znanie, 1991. 64 p. (In Russian)
11. Kotlyarov E.Yu., Malaya E.V., Sysoev V.K., Khmel D.S., Yudin A.D. The Concept of Protective Transformable Structures for Lunar Rovers. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2024; 12 (156): 1–16. (In Russian)
12. Khmel' D.S. Inflatable Curable Structures in Space. In: *Proc. 56th Sci. Readings 'Tsiolkovskii and Scientific and Engineering Progress in the 21st Century'*. Kaluga, 21–23 September 2021. Pp. 82–85. (In Russian)

Сведения об авторе

Малая Елена Владимировна, канд. архитектуры, доцент, Московский архитектурный институт (государственная академия), 107031, г. Москва, ул. Рождественка, 11/4, корп. 1, стр. 4; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1; научный сотрудник, АО «ЦНИИПромзданий», 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, 46, корп. 2, arxe_elena@mail.ru

Author Details

Elena V. Malaya, PhD, A/Professor, Moscow Architectural Institute (State Academy), 11, Rozhdestvenka Str., 107031, Moscow, Russia, Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow, Russia, AO "TSNIIpromzdaniy", 46, Dmitrovskoe Road, 127238, Moscow, Russia, arxe_elena@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.03.2025
Одобрена после рецензирования 30.04.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 26.03.2025
Approved after review 30.04.2025
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 54–59.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 54–59.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 2.1.13.

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-54-59

EDN: EIUVHY

ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕСОПАРКОВЫХ ЗЕЛЕННЫХ ПОЯСОВ

Екатерина Евгеньевна Марченко

*Новосибирский государственный университет архитектуры,
дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена усилением негативного воздействия последствий урбанизации на человека, в числе которых разрастание площади города, сокращение сельскохозяйственных зон и частных ферм. В этой связи представляет научный интерес анализ подходов к созданию лесопарковых зеленых поясов других стран. Рассматриваются подходы к формированию лесопарковых зеленых поясов на основе анализа опыта крупнейших городов: Лондона, Торонто, Стокгольма, Сеула, Пекина, Москвы, Санкт-Петербурга и Уфы.

Целью исследования является выявление современных тенденций в создании лесопарковых зеленых поясов, их функционального наполнения и планировочных особенностей. Автором графически изображены обобщенные схемы лесопарковых зеленых поясов для европейского, азиатского и российского опыта, анализируется их связь с застройкой, городским озеленением, а также выявляются сходства и различия в планировке и размещении общественных центров.

Методы. Методология исследования базируется на градостроительном анализе и сравнительном методе. Были изучены материалы открытого доступа сети Интернет и электронных ресурсов. Карты городов были соотнесены друг с другом для выявления общих и уникальных планировочных черт.

Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования методов размещения зеленых поясов и структурного преобразования существующих городских и агломерационных планов, а также при проектировании новых объектов в пределах зеленых поясов агломераций, включая прилегающие рекреационные территории.

Ключевые слова: озеленение территорий, зеленый каркас, зеленый пояс, зеленый пояс агломерации, лесопарковые зеленые пояса, городские леса, пригородные зоны, планировочные схемы лесопарковых зеленых поясов, особенности планировки лесопарковых зеленых поясов

Для цитирования: Марченко Е.Е. Планировочные особенности лесопарковых зеленых поясов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 54–59. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-54-59. EDN: EIUVHY

ORIGINAL ARTICLE

PLANNING OF FOREST-PARK GREENBELTS

Ekaterina E. Marchenko*Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts,
Novosibirsk, Russia*

Abstract. The article considers the formation of forest-park greenbelts, based on the analysis of London, Toronto, Stockholm, Seoul, Beijing, Moscow, Saint-Petersburg and Ufa. Diagrams depict generalized greenbelt schemes in the Europe, Asia and Russia. The paper identifies planning and connections with the development and urban landscaping, similarities and differences in greenbelt planning, and placement of public centers.

Purpose: The identification of modern trends in the creation of forest-park greenbelts, determination of the functional content of greenbelts.

Methodology: The analysis of materials from the open access, electronic resources. The main part of the study is based on the urban analysis and generalization of literature used to create greenbelts in the Europe, Asia and Russia. The comparison is used for city maps correlating with each other and similar and different plannings are identified.

Research findings: Results can be used to revise methods of placing greenbelts for structural transformation of both existing city and agglomeration plans, and in the design of new objects within the greenbelts of agglomerations, including recreational areas.

Keywords: green frame; urban forest; landscaping; agglomeration; forest-park greenbelt; suburban areas; planning

For citation: Marchenko E.E. Planning of Forest-Park Greenbelts. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 54–59. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-54-59. EDN: EIUVHY

Введение

Города быстро расширяются, что приводит к вытеснению природных территорий. Озелененные зоны постепенно исчезают, а урбанизированные пространства продолжают увеличиваться, что усугубляет транспортные проблемы и снижает доступность социальной инфраструктуры. Развитие агломераций является важным фактором экономического роста как регионов, так и всей страны. В последние годы озеленение крупных городов и агломераций становится мировой тенденцией. Одним из приоритетных направлений является создание лесопарковых зеленых поясов (ЛЗП).

Результаты

Для формирования современного подхода к созданию лесопарковых зеленых поясов проанализирован существующий отечественный и зарубежный опыт формирования ЛЗП, выявлены основные тенденции их организации [1]. В каждом городе формирование ЛЗП имеет уникальные особенности, обусловленные географическими, климатическими и градостроительными условиями. Однако можно выделить ряд общих аспектов. При этом в одних городах озеленение базируется на исторически сложившейся основе, в то время как в других – этот процесс начался относительно недавно. Наибольший интерес представляют основные характеристики подходов к ЛЗП, которые имеют масштабный характер и отличают конкретный город от других.

Сходства в расположении зеленых поясов. Несмотря на различия в географии, климате и градостроительных традициях, во всех рассматриваемых городах можно выделить общие черты в организации лесопарковых поясов [2].

Связь с водными объектами

Во многих мегаполисах парковые зоны формируются вдоль рек, озер и других водных объектов:

- в Торонто зеленый пояс проходит вдоль р. Дон и оз. Онтарио [3];
- в Стокгольме – вдоль многочисленных каналов и заливов Балтийского моря;
- в Сеуле важную роль в структуре города играет экологическая зона р. Ханган.

Это позволяет органично вписать природные территории в структуру города.

Экологическая роль

Лесопарковые пояса создаются для улучшения городской среды. В Москве и Санкт-Петербурге они снижают уровень загрязнения воздуха, в Сеуле и Пекине зеленые насаждения помогают бороться со смогом, в Торонто и Лондоне зеленые зоны предотвращают перегрев городской среды в летний период.

Связь с транспортной инфраструктурой

Практически во всех мегаполисах зеленые зоны тесно связаны с сетью пешеходных и велосипедных маршрутов [4]. Так, в Стокгольме, Торонто и Лондоне зеленые пояса включают специальные экотропы для прогулок и пробежек.

Различия в планировке лесопарковых поясов. Несмотря на общие принципы, планировка лесопарковых поясов в разных частях света имеет свои особенности [5].

Европейский опыт

В городах Европы, рассматриваемых в статье, сложилась тенденция создания кольцевых планировок лесопарковых зеленых поясов [6]. Исключение составил Стокгольм, где используется клиновидная система пояса. Такая структура создает зеленые коридоры, способствующие контакту горожан с естественной природой. Пояс располагается за границами города, но входит в границы агломерации (рис. 1).

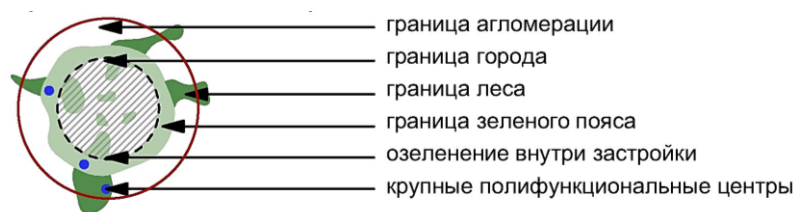


Рис. 1. Упрощенная схема строения зеленого пояса для европейского опыта
Fig. 1. Simplified scheme of the greenbelt structure in Europe

Территории зеленых поясов в Европе защищены законодательно. Исключения делаются только при согласовании с общественностью. В европейской практике в рамках ЛЗП активно развивается агротуризм, включающий частные экофермы, рестораны и тактильные зоопарки при них, также есть и государ-

ственные сельскохозяйственные угодья [2]. На участках, примыкающих к городской застройке, предусмотрены зоны активного отдыха с веломаршрутами разной сложности. Кроме того, в границы ЛЗП входят заповедники и охраняемые природные территории.

Азиатский опыт

Лесопарковые зеленые пояса в Азии имеют свои характерные черты, обусловленные высокой плотностью населения, климатическими и культурными особенностями [7]. В условиях ограниченной территории зеленые пояса часто проектируются компактными, но многофункциональными. Например, зеленый пояс Пекина сочетает лесные массивы, сельскохозяйственные зоны и рекреационные парки, создавая синтез природных и антропогенных элементов. В некоторых случаях в состав ЛЗП включены исторические объекты, например храмы, что подчеркивает их культурную значимость [8]. Зеленые пояса также выполняют функцию разграничения, предотвращая срастание соседних городов. Однако в Китае часто возникают конфликты между застройщиками и экологами, т. к. зеленые пояса интегрируются в городскую среду и возникает потребность в урбанизации территории ЛЗП (рис. 2).

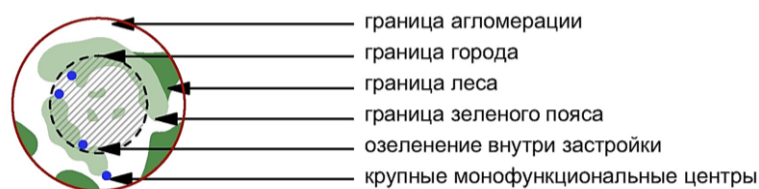


Рис. 2. Упрощенная схема строения зеленого пояса для азиатского опыта
Fig. 2. Simplified scheme of the greenbelt structure in Asia

Российский опыт

В российской практике применяется преимущественно дисперсная и клиновидная системы озеленения, при которых лесопарки и зеленые зоны формируются вдоль естественных ландшафтных элементов, например рек и оврагов [9]. В отличие от многих европейских стран, в России зеленые пояса основаны на использовании естественных лесов, а не искусственных посадок. Эти территории включают в себя заповедные зоны, чаще всего – природные леса, которые в большинстве случаев остаются нетронутыми человеком и не подвергаются благоустройству (рис. 3).

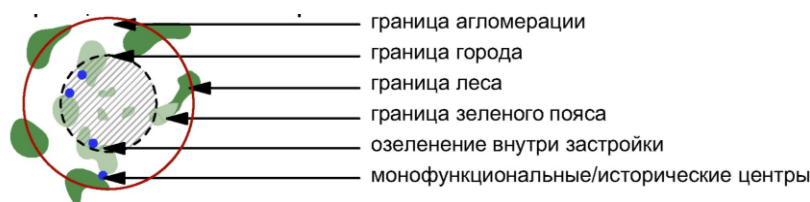


Рис. 3. Упрощенная схема строения зеленого пояса для российского опыта
Fig. 3. Simplified scheme of the greenbelt structure in Russia

ЛЗП в России законодательно охраняются, но на практике встречаются проблемы незаконной вырубки и застройки.

Выводы

В ходе проведения анализа был изучен опыт создания лесопарковых зеленых поясов за промежуток 1935–2021 гг. Был проанализирован материал об особенностях формирования поясов, изучены цели создания, история формирования и функциональное наполнение. Зарубежная практика демонстрирует более последовательное развитие, в отечественной же практике наблюдались периоды «застоя», когда внимание к ЛЗП существенно снижалось [10].

Преимуществами наличия ЛЗП для агломерации являются улучшение экологической ситуации, сдерживание хаотичного территориального роста города и сохранение биоразнообразия.

Россия ориентируется на сохранение естественных лесов и обеспечение рекреационных функций, однако сталкивается с проблемами незаконной застройки.

Европа активно использует зеленые пояса как инструмент управления развитием городов, ограничивая их площадь и включая в их состав аграрные зоны для обеспечения населения свежими продуктами.

Азия делает акцент на многофункциональность и интеграцию ЛЗП с урбанизированной средой, адаптируя зеленые пояса к климатическим вызовам (наводнения, песчаные бури) и социально-демографическим особенностям (высокая плотность населения).

Таким образом, российская модель ЛЗП ближе к природоохранному подходу, европейская – к управлению городским пространством, а азиатская – к максимальной адаптации под экономические и природные условия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Na Xiu, Ignatieva M., Konijnendijk C. The Challenges of Planning and Designing Urban Green Networks in Scandinavian and Chinese Cities // *Journal of Architecture and Urbanism*. 2016. V. 40 (3). P. 163–176. URL: https://www.researchgate.net/publication/286447185_The_Challenges_of_Planning_and_Designing_Urban_Green_Networks_in_Scandinavian_and_Chinese_Cities (дата обращения: 08.10. 2024).
2. Авраменко А.А., Метлицкая Н.И. Сравнительный анализ подходов к озеленению городов за рубежом (на примере Пекина, Сеула и Оттавы) // *Наукоедение*. 2017. Т. 9. № 4. С. 1–18. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/14EVN417.pdf> (дата обращения: 08.10. 2024).
3. Бенгстон Д.Н., Йео-Чанг Юн. Urban Containment Policies and the Protection of Natural Areas: The Case of Seoul's Greenbelt. URL: <https://dlc.dlib.indiana.edu/dlcrest/api/core/bitstreams/da8f6f71-dde2-4ee5-b136-8b5e45a2cc1a/content> (дата обращения: 08.10. 2024).
4. *Справочник проектировщика*. Градостроительство / под общ. ред. В.Н. Белоусова. Москва : Стройиздат, 1978. 367 с.
5. *Зеленый пояс крупных городов*: Реферативный обзор. Москва : Центр науч.-техн. информации по гражд. строительству и архитектуре, 1968. 25 с. (Градостроительство / Гос. ком. по гражд. строительству и архитектуре при Госстрое СССР).
6. Оленина Т.Ю. Особенности правового режима лесопаркового зеленого пояса // *Российская юстиция*. 2019. № 4. С. 19–20. EDN: BHSIJJ
7. Коростелева М.В., Коростелева Н.В. Правовое регулирование порядка создания лесопарковых зеленых поясов в Российской Федерации // *Муниципальное имущество: экономика, право, управление*. 2018. № 2. С. 34–37. EDN: XQGFML

8. Казарян Р.А., Хачатрян В.В. Экологический каркас города или зелёный пояс // Вестник евразийской науки. 2020. Т.12. № 1. 13 с. URL: <https://esj.today/PDF/82SAVN120.pdf>
9. Черкесова В.С. Анализ и концепция развития «Зеленого пояса» Волгограда // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета : тезисы докладов. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2019. 365 с.
10. Белоусов С.А., Махонько Н.И., Тарасова Е.А., Баринов П.С., Плотникова Ю.А. Зарубежный и отечественный опыт правового регулирования озеленения урбанизированных территорий // Вестник Саратовской государственной юридической академии. 2022. № 2 (145). С. 254–261. DOI: 10.24412/2227-7315-2022-2-254-261. EDN: N FYULB

REFERENCES

1. Xiu N., Ignat'eva M., Koniinendeik S. The Challenges of Planning and Designing Urban Green Networks in Scandinavian and Chinese Cities. *Journal of Architecture and Urbanism*. 2016; 40 (3): 163–176. Available: www.researchgate.net/publication/286447185
2. Avramenko A.A., Metlitskaya N.I. Comparative Analysis of Approaches to Urban Greening Abroad (on the example of Beijing, Seoul and Ottawa). *Naukovedenie*. 2017; 9 (4), 1–18. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/14EVN417.pdf> (accessed October 8, 2024) (In Russian)
3. Bengston D.N. Yeo-Chang Yun: Urban Containment Policies and the Protection of Natural Areas: The Case of Seoul's Greenbelt. *Ecology and Society*. 2006; 11(1). Available: <https://dlc.dlib.indiana.edu/dlcrest/api/core/bitstreams/da8f6f71-dde2-4ee5-b136-8b5e45a2cc1a/content> (accessed October 8, 2024).
4. Belousov V.N. Handbook of the Designer. Moscow: Gradostroitel'stvo. 1978. 367 p. (In Russian)
5. Greenbelt of large cities: Abstract review. Moscow: Tsentr nauchno-tekhnicheskoi informatsii po grazhdanskomu stroitel'stvu i arkhitekture, 1968. 25 p. (In Russian)
6. Olenina T.Yu. Legal Regime of the Forest-Park Greenbelt. *Rossiiskaya yustitsiya*. 2019; (4): 19–20. EDN: BHSIJJ (In Russian)
7. Korosteleva M.V., Korosteleva N.V. Legal Regulation of Creating Forest-Park Greenbelts in the Russian Federation. *Munitsipal'noe imushchestvo: ehkonomika, pravo, upravlenie*. 2018. № 2. EDN: XQGFML (In Russian)
8. Kazaryan R.A., Khachatryan V.V. Ecological Framework of City or Greenbelt. *Vestnik evrazijskoi nauki*. 2020; 12 (1): 13. Available: <https://esj.today/PDF/82SAVN120.pdf> (In Russian)
9. Cherkesova V.S. Analysis and Concept of Greenbelt Development in Volgograd. Volgograd State technical University, Volgograd 2019. 365 p. (In Russian)
10. Belousov S.A., Makhonko N.I., Tarasova E.A., Barinov P.S., Plotnikova Yu.A. Russian and Foreign Experience in Legal Regulation of Landscaping in Urban Areas. *Vestnik Saratovskoi gosudarstvennoi yuridicheskoi akademii*. 2022; 2 (145): 254–261. DOI: 10.24412/2227-7315-2022-2-254-261. EDN: N FYULB (In Russian)

Сведения об авторе

Марченко Екатерина Евгеньевна, магистрант, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, 630099, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 38, katimarchenko@yandex.ru

Author Details

Ekaterina E. Marchenko, Graduate Student, Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, katimarchenko@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.04.2025
Одобрена после рецензирования 26.05.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 17.04.2025
Approved after review 26.05.2025
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 60–80.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 60–80.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.035

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-60-80

EDN: FONSQL

АРХИТЕКТУРНОЕ НАСЛЕДИЕ КУПЕЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ГОРОДОВ КРАСНОЯРСКА И АЧИНСКА

Дарья Валерьевна Прислонова

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования определяется недостаточной изученностью исторических промышленных объектов, сохранившихся на территории городов бывшей Енисейской губернии – Красноярска и Ачинска, что является препятствием при установлении их архитектурно-градостроительной ценности и последующем сохранении. Утрата данных объектов приведет к исчезновению ценного элемента исторической памяти о промышленном развитии региона.

Целью работы является выявление объектов промышленной застройки, возведенных на средства купечества, анализ их исторической и архитектурно-градостроительной ценности. Исследование разработано на основе материалов библиографического, историко-архивного и натурного исследований с использованием методов историко-архитектурного, ретроспективного, картографического и иконографического анализа.

В результате исследования на территории городов Красноярска и Ачинска и их пригородов были выявлены сохранившиеся объекты промышленной застройки, принадлежавшие местному купечеству: корпус стекольного завода под Красноярском, кожевенный и пивоваренные заводы в Ачинске. Техническое состояние этих объектов различное: корпус стекольного завода руинирован, объекты пивоваренного и кожевенного заводов находятся в ограниченно работоспособном состоянии. Существуют высокие риски утраты исторических построек, что требует принятия скорейших мер по исследованию зданий, признанию их ценности и сохранению.

Ключевые слова: архитектурное наследие, историко-градостроительная среда, промышленная архитектура, купечество, Красноярск, Ачинск

Для цитирования: Прислонова Д.В. Архитектурное наследие купеческих промышленных комплексов городов Красноярска и Ачинска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 60–80. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-60-80. EDN: FONSQL

ORIGINAL ARTICLE

ARCHITECTURAL HERITAGE OF MERCHANT INDUSTRIAL CITIES OF KRASNOYARSK AND ACHINSK

Darya V. Prislono

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The relevance of research is determined by the insufficient study of historical industrial facilities preserved in the cities of the former Yenisei province – Krasnoyarsk and Achinsk, which is an obstacle in establishing their architectural and urban values and subsequent preservation. The loss of these facilities leads to a disappearance of a valuable element of the historical memory of the industrial development of the region.

Purpose: Identification of industrial buildings built by merchants, the analysis of their historical, architectural and urban values.

Methodology: Bibliographic documents, historical-archival and field research based on methods of historical-architectural, retrospective, cartographic and iconographic analyses.

Research findings: Preserved industrial buildings belonging to local merchants are identified in the cities of Krasnoyarsk and Achinsk and their suburbs: the glass factory near Krasnoyarsk, tanneries and breweries in the city of Achinsk. The technical condition of these facilities is different: the glass factory is destroyed, and the brewery and tannery facilities are in a limited working condition. The risk of loss of historical buildings is high. It is therefore required to take early measures to study buildings, recognize their value and preserve.

Keywords: architectural heritage, historical and urban environment, industrial architecture, merchants, Krasnoyarsk; Achinsk

For citation: Prislono D.V. Architectural Heritage of Merchant Industrial Cities of Krasnoyarsk and Achinsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 60–80. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-60-80. EDN: FONSQR

Представленная статья написана в рамках работы над кандидатской диссертацией, посвященной исследованию влияния купеческого сословия на формирование архитектурного облика городов Красноярского края.

Научная база формировалась из работ, освещающих различные аспекты исследования архитектуры, возведенной на средства купечества. История сибирского купечества и его вклад в формирование архитектурного облика городов Западной Сибири широко рассмотрены в монографиях: «Сибирское купечество и формирование архитектурного облика г. Томска в XIX – начале XX в.», 2008 г. [1], «Архитектура городов Томской губернии и сибирское купечество (XVII – начало XX века). Томск, Бийск, Барнаул, Кузнецк, Колывань, Камень-на-Оби, Нарым, Мариинск, Новониколаевск», 2011 г. [2], «Формирование архитектурного облика городов Западной Сибири в XVII – начале XX в. и местное купечество (Тобольск, Тюмень, Томск, Тара, Омск, Каинск)», 2017 г. [3]. Анализ влияния купечества на формирование архитектурного облика городов Красноярска и Ачинска выполнен в статьях Д.В. Прислоновой, Е.В. Ситниковой [4, 5] и В.П. Бойко [6]. Истории градостроительного и архитектурного развития городов Красноярска и Ачинска посвящены труды В.И. Царева и Ю.И. Гринберг [7], В.Т. Горбачева, Н.Н. Крадина, Н.П. Крадина, В.И. Крушлинского, Т.М. Степанской, В.И. Царева [8].

Для определения и формирования объективной картины об уровне экономического и промышленного развития исследуемых городов во второй половине XIX – начале XX столетия были изучены работы Т.А. Кискидосовой [9, 10] и В.И. Федоровой [11].

Результаты исследования промышленной архитектуры, возведенной при содействии купцов в городах Сибири, отражены в статьях Ю.А. Ивановой и Е.В. Ситниковой [12], В.И. Елизаровой и В.И. Коренева [13], К.Г. Латышевой и В.И. Царева [14].

Научная новизна работы заключается в выявлении сохранившихся исторических промышленных комплексов, построенных купцами в городах Красноярске и Ачинске и их пригородах, раскрытии ранее неизвестных фактов и материалов о данных постройках, систематизации полученной информации, в определении архитектурной, градостроительной и исторической ценности этих объектов.

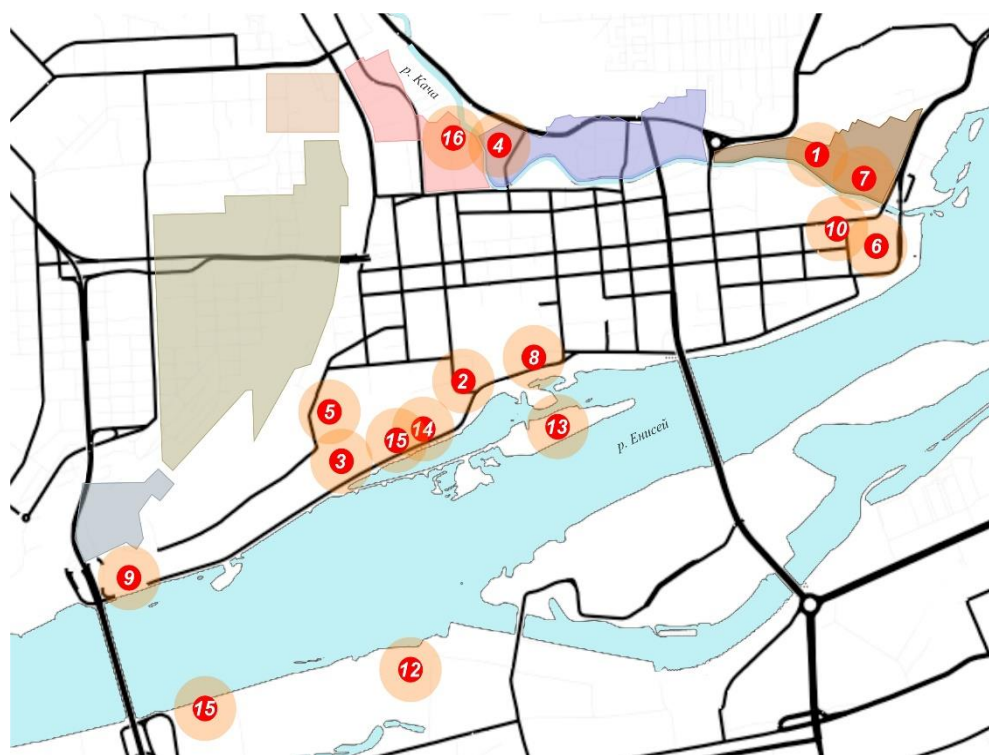
На территории Енисейской губернии, в частности в городах исследования Красноярске и Ачинске, сфера промышленности вплоть до конца XIX в. была слабо развита. К концу XIX в. среди регионов Сибири губерния занимала четвертое место по числу предприятий [9, с. 149]. Большая часть предприятий располагалась в сельской местности и была приближена к источнику сырья, т. к. была ориентирована на переработку сельскохозяйственной продукции [9, с. 153]. В черте города частные предприятия были представлены небольшими мануфактурными производствами с низким уровнем технологической оснащенности. Согласно ведомостям заводов и фабрик, в большинстве случаев количество рабочих на предприятиях, располагавшихся в городах Красноярске и Ачинске, не превышало 10 чел. (рис. 1, табл. 1). Некоторые производства имели по 1–3 работника и принадлежали мещанам [11, с. 89].

Золотопромышленник, купец и исследователь Н.В. Латкин в своем очерке 1892 г. «Енисейская губерния, ее прошлое и настоящее» характеризует состояние местного производства следующим образом: «Несмотря на значительные минеральные и ископаемые богатства, на возрастающую потребность увеличивающегося из года в год населения и нужды золотопромышленности в необходимых металлических изделиях и полезных минералах, ныне большинство производивших или из России, или с Урала, или из Западной Сибири, несмотря на богатые железные руды, как в Минусинском округе, так и в других местах, как-то: под самым почти городом Енисейском и в Канском округе, обилие каменной соли, фабрично-заводская промышленность губернии незначительна, за исключением, впрочем, винокурения, и развивается крайне медленно» [18, с. 254]. Значительный потенциал и экономический подъем на рубеже XIX–XX вв. не был реализован в сфере обрабатывающей промышленности. Развивались главным образом отрасли, связанные с добычей сырьевых ресурсов: золотопромышленность, позднее добыча угля и металлических руд [11, с. 89].

Помимо винокурения, отмеченного Н.В. Латкиным, достаточно успешно развивалась и кожевенная промышленность. Данные отрасли производства были наиболее распространены, т. к. предполагали низкие издержки и достаточно высокие доходы.

Строительство Сибирской железной дороги в конце XIX – начале XX в. способствовало развитию новой успешной производственной сферы – лесной

промышленности и лесозаготовки. Активно стали открываться лесопильные заводы. Наиболее успешными промышленниками в данной области стали красноярские купцы Е.А. Жоголев и И.З. Либман, имевшие лесопильные заводы в Красноярске с количеством рабочих более 100 чел. Основным закупщиком местного леса и пиломатериалов выступало Управление Сибирской железной дороги.



Условные обозначения

-  – месторасположение комплекса / экспликационный номер
- Территории исторических слобод г. Красноярска
-  – Закаченская слобода
 -  – Покровская слобода
 -  – Слобода Попов Луг
 -  – Железнодорожная слобода
 -  – Николаевская слобода
 -  – Слобода Таракановка

Рис. 1. Ситуационная схема расположения купеческих промышленных комплексов в черте Красноярска (по данным 1887–1888 гг., 1910, 1912, 1914 гг.) [15, 16, 17, 20]. Составлена Д.В. Прислоновой, 2025 г.

Fig. 1. Layout of merchant industrial complexes in Krasnoyarsk (according to the data of the years 1887–1888, 1910, 1912, 1914). [15, 16, 17, 20]. Compiled by D.V. Prislonoa, 2025

Таблица 1

**Экспликация купеческих промышленных комплексов,
располагавшихся на территории Красноярска
(по данным 1887–1888 гг., 1910, 1912, 1914 гг.) [15, 16, 17, 20]**

Table 1

**Merchant industrial enterprises in Krasnoyarsk
(according to data of the years 1887–1888, 1910, 1912, 1914)**

№ п/п	Наименование, владелец	Период действия	Месторасположе- ние	Среднее количество рабочих, чел.	Степень сохранно- сти
1	Кожевенный завод купца 2-й гильдии А.М. Егорова	1846 г. – нач. XX в.	Красноярск, Зака- чинская слобода	9	Утрачен
2	Пиво-медоваренный завод «Бавария» купца 1-й гильдии П.С. Смирнова	1886 г. – нач. XX в.	Красноярск, по ул. Береговой и ул. Садовой	4	Утрачен
3	Пивоваренный за- вод купца 2-й гиль- дии О.А. Данилова	1887 г. – нач. XX в.	Красноярск, предмесье Тере- биловка	7	Утрачен
4	Пиво-медоваренный завод «Вена» купца 2-й гильдии Г.В. Юдина	1887 г. – сер. XX в.	Красноярск, за р. Качей, на даче купца	3	Утрачен
5	Пивоваренный за- вод «Богемия» торг.-пром. тов. «Пивовар»	1896 г. – пер. пол. XX в.	Красноярск, вблизи ж/д стан- ции	45	Утрачен
6	Пивоваренный за- вод «Ливония» Ю.Ю. Гинца	1911 г. – пер. пол. XX в.	Красноярск, пл. Старобазар- ная	5	Утрачен
7	Пивоваренный завод «Новая Богемия» И.А. Гинцингер	1911 г. – пер. пол. XX в.	Красноярск, Зака- чинская слобода	10	Утрачен
8	Дрожжевой завод Г.О. Кульдкепа	1911 г. – пер. пол. XX в.	Красноярск, угол пер. Базарного и Ново-Кузнеч- ного ряда	3	Утрачен
9	Чугунно-литейный механическо-дела- тельный завод купца 1-й гильдии А.П. Кузнецова	1886 г. – нач. XX в.	Красноярск, сло- бода Таракановка	10	Утрачен

Окончание табл. 1

End of table 1

№ п/п	Наименование, владелец	Период действия	Месторасположение	Среднее количество рабочих, чел.	Степень сохранности
10	Завод восковых свечей купца 2-й гильдии И.И. Ларионова	1832 г. – нач. XX в.	Красноярск, Благовещенская, улица (совр. ул. Ленина), предположительно на территории усадьбы Ларионовых	2	Утрачен
11	Знаменский стеклоделательный завод (купцы Коноваловы, затем купцы О.А. и В.А. Даниловы)	1833–1996 гг.	Пригород Красноярска, д. Сухая, с. Знаменское (сов. Памяти 13 Борцов)	180	Сохранился один каменный производственный корпус (руинирован)
12	Лесопильный завод купца Е.А. Жоголева	1898 г. – пер. пол. XX в.	Красноярск, берег р. Енисей, при ст. Енисей	180	Утрачен
13	Лесопильный завод купца И.З. Либмана	1894–1922 гг.	Красноярск, остров Посадный	100	Утрачен
14	Лесопильный завод купца Ф.Г. Лукина	Конец XIX – нач. XX в.	Красноярск, берег р. Енисей	11	Утрачен
15	Лесопильный завод 1-й гильдии А.П. Кузнецова	Конец XIX – нач. XX в.	Красноярск, берег р. Енисей	21	Утрачен
16	Лесопильный завод купца 2-й гильдии И.И. Никольского и купца 2-й гильдии И.Я. Сенявина	1904 г. – пер. пол. XX в.	Красноярск, вблизи железнодорожного моста	Не установлено	Утрачен
17	Паровая мельница купцов 2-й гильдии С.В. Телегина, А.В. Телегина и К. Абалокова	Конец XIX – пер. пол. XX в.	Красноярск, пер. Архиерейский	30	Утрачен

Опираясь на анализ выявленных купеческих предприятий, располагавшихся в городской черте, можно сделать вывод, что развитыми промышленными районами в Красноярске был берег р. Енисей (окрестности слобод Таракановки и предместья Теребиловки), берег р. Качи (окрестности Качинской и Закачин-

ской слобод). На берегу р. Енисей также располагались: пивоваренный завод О.А. Данилова, чугунолитейный и лесопильный заводы А.П. Кузнецова, пивоваренные заводы «Бавария», «Богемия» и лесопильные заводы. Рядом селились рабочие предприятий, образуя новые жилые кварталы. В городских районах, примыкавших к берегу р. Качи, были сосредоточены как купеческие, так и мещанские салотопенные, свечные, мыловаренные и кожевенные заводы [10, с. 137]. Здесь же находился пиво-медоваренный завод «Вена» Г.В. Юдина (рис. 2). На территории слобод проживали преимущественно работники предприятий. К сожалению, все перечисленные объекты до настоящего времени не сохранились.

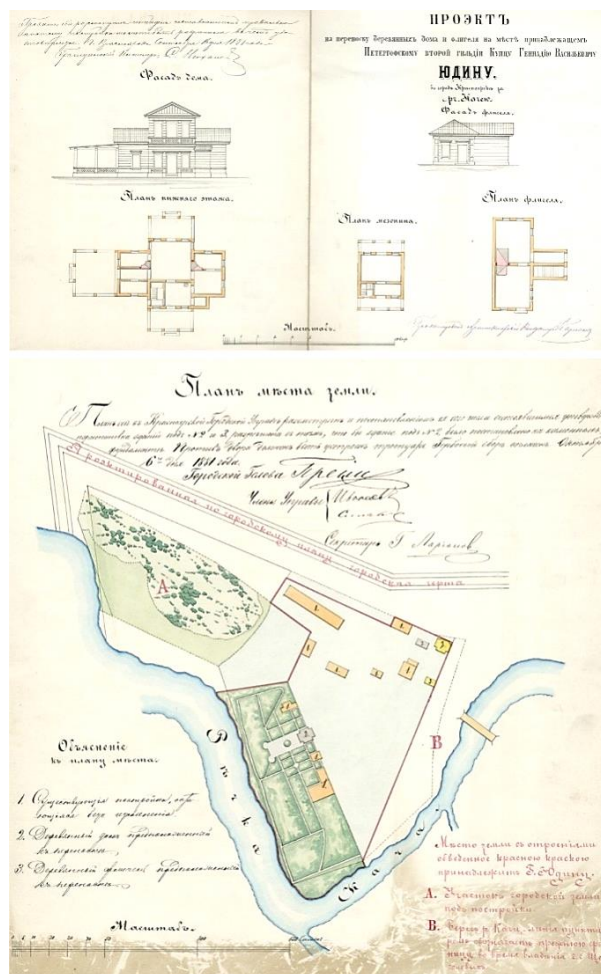


Рис. 2. Проект на перенос деревянного дома и флигеля на участке, принадлежавшем купцу второй гильдии Геннадию Васильевичу Юдину в г. Красноярске за р. Качей, 1881 г. Территория пиво-медоваренного завода «Вена» купца Г.В. Юдина (ранее не публиковалось) [22]

Fig. 2. Project of moving a wooden house and outbuilding on a plot owned by Gennady Vasilyevich Yudin, a merchant of the second guild, across the Kachey River in Krasnoyarsk, 1881. The territory of the beer and honey factory "Vienna" by merchant G.V. Yudin (previously unpublished) [22]

В пригороде г. Красноярска, в п. Памяти 13 Борцов (до 1920 г. Знаменское), сохранилось руинированное здание производственного цеха некогда крупного Знаменского стекольного завода (рис. 3). В 1823 г. коллежским советником и купцом 3-й гильдии И.И. Коноваловым на берегу р. Качи был основан стекольный завод с ручным производством. Прошение об открытии и выделении земельного участка под строительство было подано от лица матери И.И. Коновалова – Анны Григорьевны [19].

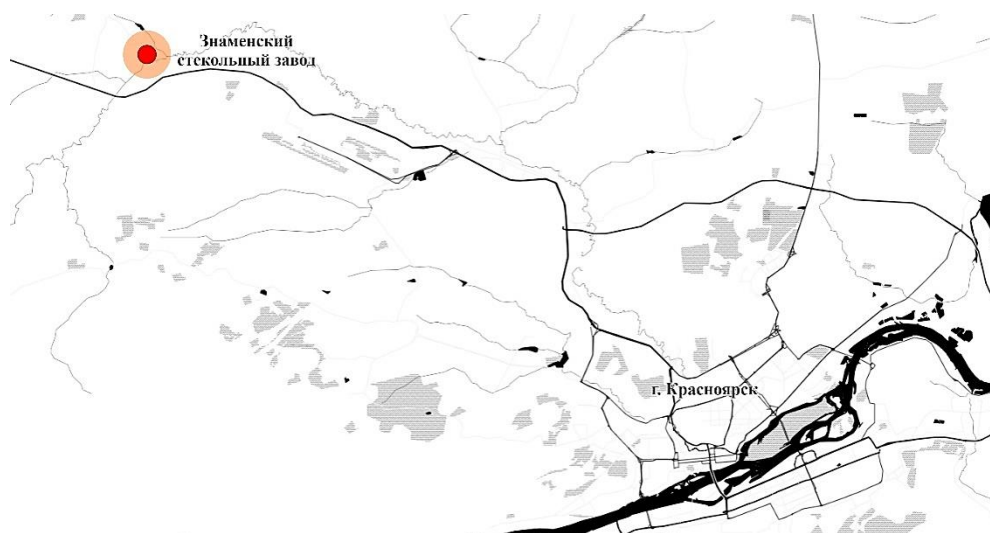


Рис. 3. Ситуационная схема месторасположения Знаменского стекольного завода. Составлена Д.В. Прислоновой, 2025 г.

Fig. 3. Layout of the glass factory in Znamensk. Compiled by D.V. Prislonova, 2025

К 1825 г. на территории завода числились следующие постройки: двухэтажный флигель, где проживали хозяева предприятия, деревянная изба и горница для чернорабочих, сарай и баня. В производственном здании была устроена мастерская, а также закальная, дровосушильная и разводная печи [19]. Основной продукцией являлось листовое стекло. В 1853 г. на территории завода был построен корпус производства фаянсовой посуды [11, с. 75]. По состоянию на 1886–1887 гг. все постройки завода были деревянные [21].

Вокруг завода стали возводить жилые дома рабочих, и постепенно здесь сформировался поселок. В 1833 г. по инициативе и на средства И.И. Коновалова [20, с. 22] на территории поселка была построена Знаменская церковь в стиле классицизм с двухъярусной колокольней (рис. 4). Современниками было составлено подробное описание храма: «Церковь каменная одноэтажная, соединенная с таковою же колокольнею и крыльцом с четырьмя колоннами, которые поддерживают сверх одного фронтона, в длину имеет 11 сажень, в ширину 4 сажени и 2 аршина. Престол один: во имя Знамения Божией Матери <...> купол один, крестов три». Из «Краткого описания приходов Енисейской епархии» за 1916 г. известно, что в приходе церкви числились две монастырские школы. Церковь дала название сложившемуся заводскому поселению – Знаменское (рис. 5).



Рис. 4. Территория Знаменского стекольного завода. На заднем плане Знаменская церковь. Фото начала XX в. [23]

Fig. 4. The territory of the glass factory in Znamensk. Early 20th century [23]



Рис. 5. Территория Знаменского стекольного завода. Фото начала XX в. [23]

Fig. 5. The territory of the glass factory in Znamensk. Early 20th century [23]

В 1880-х гг. вблизи территории завода и поселения начал формироваться Знаменский женский монастырь, официально утвержденный указом Высшего духовного Синода в 1888 г. В 1890 г. на новом месте были построены шесть крупных корпусов и деревянная церковь Спаса Нерукотворного Образа.

В 1908 г. Знаменский стекольный завод переходит в собственность известных купцов братьев Иосифа и Виктора Даниловых. После приобретения они начали капитальную реконструкцию предприятия, и для этого был приглашен специалист по стеклопроизводству из Бельгии Иосиф Лифебро. Инженер составил план нового производства, привязав его к местности, он же стал автором проектов основного и вспомогательного цехов (рис. 6). В августе 1912 г. было освящено ме-

сто и заложены здания будущего производства, в короткие сроки строительство закончилось, объекты были оснащены современным оборудованием [19].

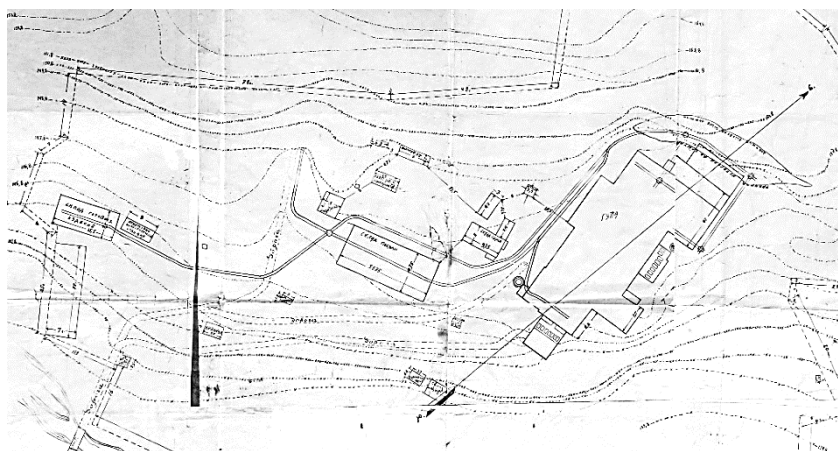


Рис. 6. План усадьбы Знаменского стеклозавода в п. «Памяти 13 борцов» Емельяновского района. 1920 г. (ранее не публиковалось) [25]

Fig. 6. Layout of the glass factory in a Znamensky village, Yemelyanovsky region, 1920s (previously unpublished) [25]

Для рабочих в 1910-е гг. были построены жилые корпуса и школа для детей. Официально общеобразовательное учреждение появилось в поселке в 1912 г. Проект на постройку школы при Знаменском стеклоделательном заводе разработал техник Н.А. Петериков в 1910 г. – это было деревянное одноэтажное здание (рис. 7) [24].



Рис. 7. Проект на постройку школы для детей рабочих при Знаменском стеклоделательном заводе братьев Даниловых вблизи Красноярска. Проектировал техник Н.А. Петериков, 1910 г. (ранее не публиковалось) [24]

Fig. 7. Design project of school for children of workers at the Danilovs brothers glass factory in Znamensk near Krasnoyarsk. Designed by N.A. Peterikov, 1910 (previously unpublished) [24]

После установления советской власти завод был национализирован. Женский монастырь закрыт, а Знаменская церковь в первой половине XX в. разобрана. Поселок продолжал развиваться как рабочий. Производство долгое время оставалось достаточно успешным. В 1996 г. завод был объявлен банкротом и ликвидирован.

К настоящему времени сохранилось только здание главного каменного корпуса, построенное в 1912 г. Объект находится в северо-восточной части поселка на возвышенности и представляет собой кирпичный остов некогда крупного двухэтажного производственного корпуса. Сохранившийся фрагмент главного фасада, ориентированного на проезд к заводу, сформирован пятью осями крупных арочных проемов. В простенках между проемами расположены объемные лопатки. Завершается фасад зубчатым фризом, профилированным карнизом и треугольным щипцом. Перекрытия и крыша здания утрачены, остальные фасады фрагментарно разрушены (рис. 8).



Рис. 8. Современный вид промышленного корпуса стекольного завода. Фото Д.В. Прислоновой, декабрь 2024 г.

Fig. 8. Modern view of the glass factory building. Photo by D.V. Prislónova, December 2024

Сохранившийся производственный корпус, несмотря на свое техническое состояние, бесспорно представляет собой ценный образец промышленного здания. К настоящему времени в Красноярском крае практически не осталось памятников, свидетельствующих о промышленном и технологическом развитии региона, а данный объект представляет собой пример успешного и долгосрочного дореволюционного производства – что было достаточно редким явлением для Енисейской губернии. Объект обладает градоформирующей

ценностью, т. к. стал ядром для зарождения нового населенного пункта. Кроме того, само здание построено по проекту профессионального инженера и является авторской постройкой.

В Ачинске по стоянию на 1916 г. насчитывалось: 1 мыловаренный и свечной завод, 2 кожевенных завода, 1 канатный, 15 кирпичных, 1 лесопильный, 1 пивоваренный (рис. 9, табл. 2). К наиболее успешным относились кожевенные заводы с общей производительностью 40 000 и самым большим количеством рабочих – 30 чел. [26, л. 9].



Рис. 9. Ситуационная схема расположения купеческих промышленных комплексов в черте г. Ачинска (по данным 1887–1888 гг., 1910, 1912, 1914 гг.) [15, 16, 17, 20]. Составлена Д.В. Прислоновой, 2025 г.

Fig. 9. Industrial complexes in Achinsk (according to data of the years 1887–1888, 1910, 1912, 1914). [15, 16, 17, 20]. Compiled by D.V. Prislónova, 2025

Таблица 2

**Торгово-промышленные предприятия, расположенные в г. Ачинске
(по данным 1887–1888 гг., 1910, 1912, 1914 гг.) [15, 16, 17, 20]**

Table 2

**Merchant industrial enterprises in Krasnoyarsk and Achinsk
(according to data of the years 1887–1888, 1910, 1912, 1914)**

№ п/п	Наименование, владелец	Период действия	Место расположения	Среднее количество рабочих, чел.	Степень сохранности
1	Кожевенный завод купца 2-й гильдии Н.М. Сутягина	1863 г. – нач. XX в.	Ачинск, за р. Чулым	6	Утрачен
2	Кожевенный завод 2-й гильдии купчихи А.С. Пелевеной, затем Тов-ва братьев Лазебниковых	1879 г. – пер. пол. XX в.	Ачинск, при р. Ачинке	30	Сохранилась часть зданий комплекса: производственный корпус, жилые дома
3	Кожевенный и мыловаренный завод купца Л.Р. Рахмиловича	1903 г. – пер. пол. XX в.	Ачинск	10	Утрачен
4	Мыловаренный завод купца И.С. Лазебникова	1908 г. – пер. пол. XX в.	Ачинск	2	Утрачен
5	Пиво-медоваренный завод комп. «Бурмакин и Прохаско»	1907 г. – пер. пол. XX в.	Ачинск, ул. Орловская	10	Утрачен
6	Пивоваренный завод торг.-пром. тов. «Пивовар»	1912–2003 гг.	Ачинск, ул. Владимирская (сов. ул. Слободчикова)	Не установлено	Сохранился производственный корпус (недоступен для обследования)
7	Лесопильный завод и мельница купца 2-й гильдии К.К. Романовского и крестьянина Ф.М. Кузнецова	1903 г. – пер. пол. XX в.	Ачинск, за р. Салыркой	Не установлено	Утрачен

Сохранившееся производственное здание пивоваренного завода товарищества «Пивовар» было запроектировано архитектором В.А. Соколовским в 1916 г. и вскоре построено (рис. 10) [7, с. 63]. Объект располагается на территории СИЗО и в настоящее время недоступен для обследования.

Основная часть промышленного производства была сосредоточена севернее жилой части города – за р. Ачинкой (рис. 9). До настоящего времени сохранилось два заводских комплекса – это кожевенный завод Товарищества братьев Лазебниковых и пивоваренный завод товарищества «Пивовар». Заводы располагаются по ул. Слободчикова (быв. ул. Владимирская) и соседствуют друг с другом.



Рис. 10. Пивоваренный завод товарищества «Пивовар» в г. Ачинске. На заднем плане производственное здание, построенное по проекту арх. В.А. Соколовского. Фото начала XX в. [27]

Fig. 10. Brewery of "Pivovar" Partnership in Achinsk. Industrial building designed by architect V.A. Sokolovsky. Early 20th century [23]

Открытым для обследования является комплекс зданий бывшего кожевенного завода Товарищества братьев Лазебниковых. Производство было куплено товариществом у вдовы купчихи 2-й гильдии А.С. Пелевеной. Первые сведения о пообъектном составе владения встречаются в страховой описи за 1916 г., на территории числятся: дом деревянный одноэтажный, три флигеля, два амбара, две конюшни, два здания мастерских, сарай и изба. Все постройки одноэтажные деревянные [28, с. 127].

В 1918 г. архитектором Т.А. Адамовичем был разработан проект на деревянное одноэтажное здание и каменные 2- и 3-этажные пристройки к существующему деревянному 2-этажному кожевенному заводу Товарищества братьев Лазебниковых. В проекте содержится подробный план участка завода с проектируемым крупным каменным зданием, расположенным на внутриквартальной территории, деревянными постройками и садом, а также проекты новых корпусов (рис. 11, 12) [29].

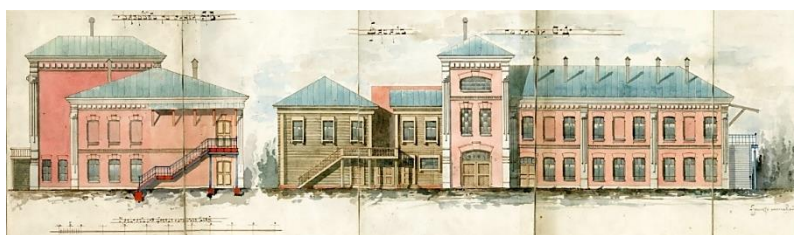


Рис. 11. Фрагмент проекта на постройку кожевенного завода Товарищества братьев Лазебниковых в г. Ачинске из материалов фонда КГБУК (ранее не публиковалось) [29]

Fig. 11. Design project of "Lazebnikov Brothers" Partnership tannery in Achinsk (previously unpublished) [29]

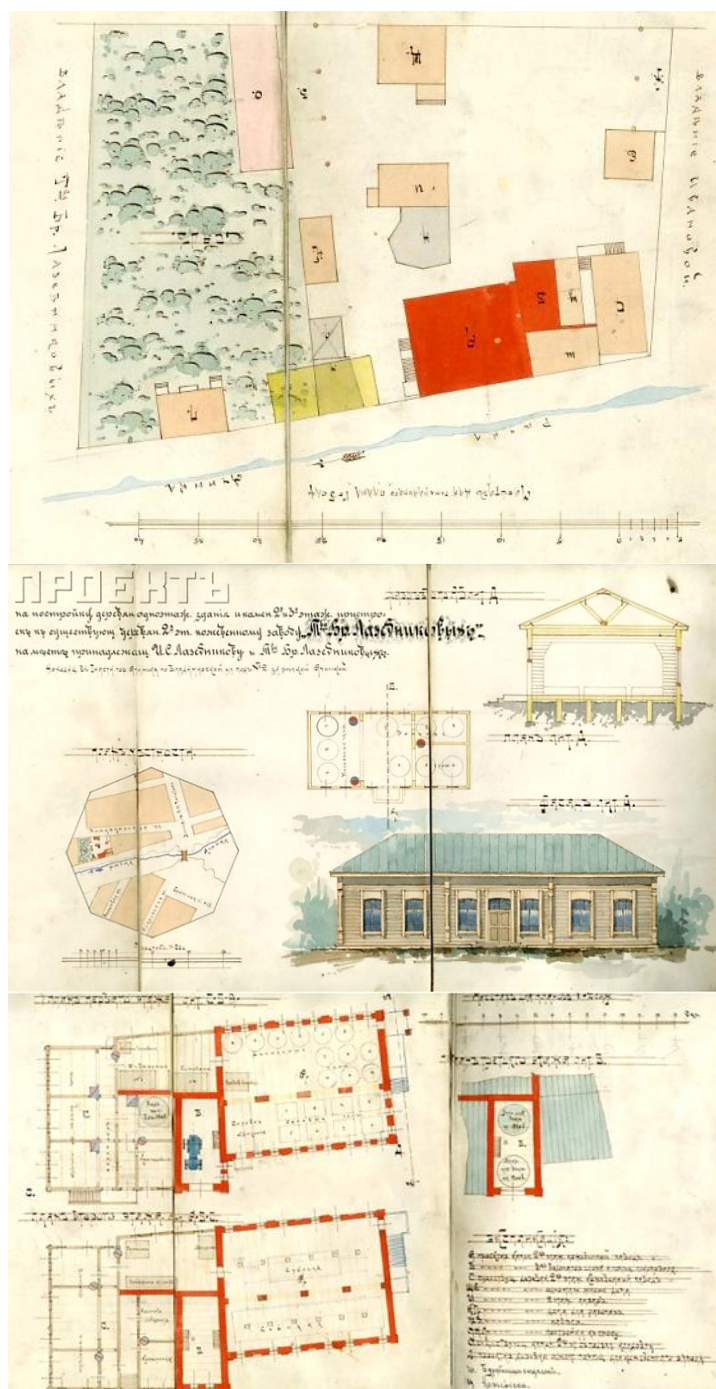


Рис. 12. Фрагмент проекта на постройку кожевенного завода Товарищества братьев Лазебниковых в г. Ачинске (ранее не публиковалось) [29]

Fig. 12. Layout of "Lazebnikov Brothers" Partnership tannery in Achinsk (previously unpublished) [29]

Основываясь на данных архивных материалов и результатах натурного обследования, возможно составить список сохранившихся построек: деревянный одноэтажный флигель (ул. Слободчикова, 4) и одноэтажный деревянный жилой дом с каменной пристройкой (ул. Слободчикова, 2а), выходящие на красную линию квартала, 2- и 3-этажный каменный корпус (ул. Слободчикова, 2б), расположенный на внутриквартальной территории. Предположительно к комплексу завода также относилось сохранившееся двухэтажное каменное здание (ул. Слободчикова, 4а), выходящее на линию застройки улицы и попадающее в обозначенные на плане 1918 г. границы владения. Все постройки приспособлены под жилые дома.

Одноэтажный флигель (ул. Слободчикова, 4) представляет собой бревенчатый объем на каменном цоколе прямоугольной конфигурации в плане с деревянной пристройкой (рис. 13). Протяженной стороной здание ориентировано на улицу. Главный фасад формируется четырьмя прямоугольными оконными проемами. Окна обрамлены наличниками с филенчатыми ставнями. Наличник состоит из треугольного сандрика с плечиками, боковин и фигурной подоконной доски. Элементы украшены резьбой. Завершается объем дома вальмовой крышей.

Одноэтажный жилой дом по ул. Слободчикова, 2а, в плане имеет Г-образную конфигурацию и сформирован двумя историческими объемами: деревянным с прирубами, выходящим на линию застройки улицы, и каменным, примыкающим к внутريدворовой территории (рис. 14). Исторический облик фасадов деревянного объема в настоящее время существенно искажен поздними обшивкой и пристройками. Сохранилась историческая конструкция крыши с треугольным фронтоном, расположенным по центральной оси главного фасада. Тимпан фронтона украшен аркой и элементом по типу деревянной фермы. Фасады каменного объема выполнены лицевой кирпичной кладкой. Окна лучковые с сандриками, украшенными зубчиками. Углы акцентированы массивными лопатками. Завершается каменный объем высоким профилированным карнизом.



Рис. 13. Современный вид жилого дома по ул. Слободчикова, 4. Фото Д.В. Прислоновой, июнь 2023 г.

Fig. 13. Modern view of a residential building on Slobodchikova St., 4. Photo by D.V. Prislonoa, June 2023



Рис. 14. Современный вид жилого дома по ул. Слободчикова, 2а. Фото Д.В. Прислоновой, июнь 2023 г.

Fig. 14. Modern residential building on Slobodchikova St., 2a. Photo by D.V. Prislonoa, June 2023

Каменный корпус (ул. Слободчикова, 2б) состоит из двух прямоугольных в плане объемов: основного двухэтажного здания завода и трехэтажной при-

стройки водонапорной башни (рис. 15). Протяженные северный и южный фасады двухэтажного объема здания завода имеют одинаковое трехчастное композиционное решение. Части разделены пилястрами. Каждый фрагмент имеет по три оси прямоугольных оконных проемов. Окна обрамлены рамочными наличниками с лучковым сандриком. Торцевой фасад имеет ряд поздних проемов и завершается ступенчатым щипцом. Фасад трехэтажной водонапорной башни, ориентированный в сторону улицы, сформирован двумя осями узких окон, расположенными по центру. В уровне первого этажа устроен широкий дверной проем с клинчатой перемычкой. Объемы завершаются высоким ступенчатым карнизом, украшенным рядами из сухариков и поребрика. Торцевой (восточный) и южный фасады практически глухие, с поздними проемами.

Дом по ул. Слободчикова, 4а, представляет собой каменный двухэтажный объем на высоком цоколе, прямоугольный в плане (рис. 16). Композиция главного уличного фасада симметрична и сформирована пятью осями лучковых окон. Окна первого этажа обрамлены плоским рамочным наличником с ушками и замковым камнем, окна второго этажа имеют профилированное рамочное обрамление. Углы объема акцентированы лопатками с филенками. Уровни фасада разделены высоким профилированным междуэтажным карнизом. Завершается объем фризом из ряда небольших ниш и профилированным карнизом. Главный фасад дополнительно акцентирован аттиком с арочным завершением, фланкирующими парапетными столбиками и кирпичным ограждением со сквозной узорчатой кладкой.



Рис. 15. Современный вид каменного корпуса завода по ул. Слободчикова, 2Б. Фото Д.В. Прислоновой, июнь 2023 г.

Fig. 15. Modern stone building of the plant on Slobodchikova St., 2B. Photo by D.V. Prislionova, June 2023



Рис. 16. Современный вид каменного дома по ул. Слободчикова, 4а. Фото Д.В. Прислоновой, июнь 2023 г.

Fig. 16. Modern stone house on Slobodchikova St., 4A. Photo by D.V. Prislionova, June 2023

Сохранившийся комплекс зданий кожевенного завода Товарищества братьев Лазебниковых представляет собой ценный исторический ансамбль – это уникальный и редкий для региона образец дореволюционного промышленного предприятия с высокой степенью подлинности и сохранности основных элементов. Комплекс является частью старинного промышленного района г. Ачинска.

Концентрация предприятий за р. Ачинкой во многом определила вектор развития городской застройки в северном направлении.

Выводы

Рассмотрев промышленную застройку, возведенную на средства красноярского и ачинского купечества, можно сделать вывод о том, что среди местных предпринимателей производственная и обрабатывающая сфера была мало популярна, за исключением винокурения и пивоварения, а также кожевенного дела. Предприятия для данных типов производства купцы предпочитали строить в сельской местности вблизи источников сырья. При этом в городах купцы владели складами и питейными заведениями.

Заводы, расположенные в городской черте, характеризовались низким технологическим уровнем оснащенности и формировались преимущественно из деревянных построек. Предприятия обладали низкой производительностью и доходностью, в результате существовали непродолжительное время. Большая часть промышленных объектов в настоящее время утрачена, за исключением сохранившихся редких образцов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Бойко В.П., Ситникова Е.В.* Сибирское купечество и формирование архитектурного облика города Томска в XIX – начале XX в. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2008. 180 с. ISBN 978-5-93057-261-2. EDN: QPKVR
2. *Архитектура городов Томской губернии и сибирское купечество (XVII – начало XX века):* Томск, Бийск, Барнаул, Кузнецк, Колывань, Камень-на-Оби, Нарым, Мариинск, Новониколаевск / под ред. В.П. Бойко. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. 480 с.
3. *Бойко В.П., Ситникова Е.В., Богданова О.В., Шагов Н.В.* Формирование архитектурного облика городов Западной Сибири в XVII – начале XX в. и местное купечество (Тобольск, Тюмень, Томск, Тара, Омск, Каинск). Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. 324 с. ISBN 978-5-93057-803-4. EDN: WGSQPX
4. *Прислонова Д.В.* Роль застройки, возведенной на средства купечества, в формировании облика городов Красноярска и Ачинска // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : материалы XIV Международной научно-практической конференции, 12–14 марта 2024 г. В 2 частях. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. С. 342–351. EDN: NPJOPG
5. *Прислонова Д.В., Ситникова Е.В.* Вклад купечества в формирование культурно-просветительской инфраструктуры городов Красноярска и Ачинска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-9-23. EDN: KTIMDH
6. *Бойко В.П.* Социально-экономическая история города Ачинска и местное купечество // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. История. 2022. № 75. DOI: 10.17223/19988613/75/2 EDN: CYBOXB. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomicheskaya-istoriya-goroda-achinska-i-mestnoe-kupechestvo> (дата обращения: 06.04.2025).
7. *Царев В.И., Гринберг Ю.И.* Ачинск: градостроительная история // Управление архитектуры и градостроительства исполкома городского Совета Ачинска. Красноярск : Стройиздат, 1992. 120 с. EDN: FTWEYP
8. *Горбачев В.Т., Крадин Н.Н., Крадин Н.П., Крушлинский В.И., Степанская Т.М., Царев В.И.* Градостроительство Сибири / под общ. ред. В.И. Царева ; Рос. акад. архит. и строит. наук, НИИ теории и истории архит. и градостроит. Санкт-Петербург : Коло, 2011. 784 с.
9. *Кискидосова Т.А.* Торгово-промышленное предпринимательство в Енисейской губернии во второй половине XIX – начале XX в. (на материалах Ачинско-Минусинского края) :

- специальность 07.00.02 : диссертация на соискание ученой степени кандидата исторических наук. Абакан, 2006. 207 с. EDN: NOGJWZ
10. *Кискидосова Т.А.* Города Енисейской губернии во второй половине XIX – начале XX в. (по материалам сибирских газет). Красноярск : Офсет, 2023. 432 с. ISBN 978-5-605-07940-8. EDN: OEBRBQ
 11. *Федорова В.И.* Енисейская губерния 1861–1917 гг.: Экономика. Общество. Культура / Краснояр. гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева. Красноярск, 2016. 344 с. ISBN: 978-5-00102-031-8. EDN: XIQROL
 12. *Иванова Ю.А., Ситникова Е.В.* Промышленные комплексы купца Д.И. Смолина в исторической застройке города Кургана // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 9–19. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-9-19. EDN: QWFUZZ
 13. *Елизарова В.И., Корнев В.И.* Промышленные объекты в планировочной структуре города Томска XVII – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-9-23. EDN: BXHQUK
 14. *Латышева К.Г., Царев В.И.* Особенности проектирования малых заводов Енисейской губернии в XIX веке // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4. С. 44–56. EDN: NVGYMM. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-proektirovaniya-malyh-zavodov-eniseyskoy-gubernii-v-xix-veke> (дата обращения: 06.04.2025).
 15. *Список фабрик и заводов России 1910 г.*: Список фабрик и заводов России тысяча девятьсот десятого года: по офиц. данным фабрич., подат. и горн. надзора / сост. ред. «Торг.-пром. газ.» и «Вестн. Финансов»; М-во финансов и М-во торговли и пром.-сти. [2-е изд.]. Москва [и др.] : Л. и Э. Метуль и К°, [1910]. [2], CCCIV, 1034 с., из них 26 с. объявл.; 26.
 16. *Список фабрик и заводов Российской империи*: Сост. по офиц. сведениям Отд. пром.-сти М-ва торговли и пром.-сти под ред. В.Е. Варзара. Санкт-Петербург : Тип. В.Ф. Киршбаума, 1912. 720 с.
 17. *Езиоранский Л.К.* Фабрично-заводские предприятия Российской империи (исключая Финляндию) / составлено под руководством редакционного комитета, состоящего из членов Совета съездов представителей промышленности и торговли; ред. Ф.А. Шобер; Совет съездов представителей промышленности и торговли. – 2-е изд. Петроград : издали инж. путей сообщ. Д.П. Кандауров и сын, 1914. [1612] с.
 18. *Латкин Н.В.* Енисейская губерния, ее прошлое и настоящее. Санкт-Петербург : Тип. и лит. В.А. Тиханова, 1892. [2], II, IV, 467 с.
 19. *Знаменский стекольный завод* // Энциклопедия Красноярского края : сайт. URL: <https://my.krskstate.ru/docs/building/znemenskiy-stekolnyy-zavod/>. Дата последнего изменения: 03.10.2014.
 20. *Краткое описание приходов Енисейской епархии* / Издание Енисейского Церковно-Историко-Археологического Общества. Красноярск : Эл.-тип. Епарх. Братсва, 1916. 243 с.
 21. *Переписка с департаментом торговли внутренних дел* о деятельности фабрик и заводов губернии, 1888 г. // Государственный архив Красноярского края. Ф. 31. Оп. 1. Д. 107.
 22. *Проект на переноску деревянных дома и флигеля на участке*, принадлежащем купцу второй гильдии Геннадию Васильевичу Юдину в городе Красноярске за рекой Качей. 1881 г. Территория пиво-медоваренного завода «Вена» купца Г.В. Юдина // Красноярский краевой краеведческий музей. О/Ф 9957/3.
 23. *Общий фотофонд* // Красноярский краевой краеведческий музей.
 24. *Проект на постройку школы для детей рабочих* при Знаменском стекольном заводе братьев Даниловых вблизи города Красноярска. Проектировал техник Н.А. Петериков. 1910 г. // Красноярский краевой краеведческий музей. О/Ф 3562/66.
 25. *План усадьбы Знаменского стеклозавода* в поселке «Памяти 13 Борцов» Емельяновского района. 1920 г. // Красноярский краевой краеведческий музей. О/Ф 3562/70.
 26. *Экономическая характеристика города Ачинска* // МКУ «Архив г. Ачинска». Ф. 9. Оп. 1. Д. 19.
 27. *Общий фотофонд* // МБУК «Ачинский краеведческий музей им. Д.С. Каргополова».

28. *Ведомость страхования частных строений домовладельцев г. Ачинска на 1916 г.* // МКУ «Архив г. Ачинска». Ф. 22. Оп. 1. Д. 106.
29. *Адамович Т.А.* Проект на постройку кожевенного завода Товарищества братьев Лазебниковых в городе Ачинске. 1918 г. // Красноярский краевой краеведческий музей. ОФ 9583.

REFERENCES

1. *Boyko V.P., Sitnikova E.V.* Siberian Merchants and Architecture of Tomsk in the 19th and Early 20th Centuries. Tomsk: TSUAB, 2008. 180 p. ISBN: 978-5-93057-261-2 EDN: QPKVRZ. (In Russian)
2. *Boyko V.P. (Ed.)* Architecture of Cities of Tomsk Province and Siberian Merchants (17th and early 20th century): Tomsk, Biysk, Barnaul, Kuznetsk, Kolyvan, Kamen-on-Obi, Naryn, Mariinsk, Novonikolaevsk. Tomsk: TSUAB, 2011. 480 p. (In Russian)
3. *Boyko V.P., Sitnikova E.V., Bogdanova O.V., Shagov N.V.* Architecture of Cities in Western Siberia in the 17th and Early 20th Centuries and Local Merchants (Tobolsk, Tyumen, Tomsk, Tara, Omsk, Kainsk). Tomsk: TSUAB, 2017. 324 p. ISBN: 978-5-93057-803-4 EDN: WGSQPX (In Russian)
4. *Prislonova D.V.* The Role of Merchant-Funded Development in the Formation of the Appearance of Krasnoyarsk and Achinsk. In: *Proc. 14th Int. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Technologies as Drivers of Socio-Economic Development and Improving the Life Quality'*, March 12–14, 2024. In 2 parts. Tomsk: TSUAB, 2024. Pp. 342–351. EDN: NPJOPG (In Russian)
5. *Prislonova D.V., Sitnikova E.V.* Merchants' Contribution to the Cultural and Educational Infrastructure of Krasnoyarsk and Achinsk. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (2): 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-9-23. EDN: KTIMDH (In Russian)
6. *Boyko V.P.* Socio-Economic History of the City of Achinsk and Local Merchants. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. Istoriya. 2022; (75). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomicheskaya-istoriya-goroda-achinska-i-mestnoe-kupechestvo> (accessed: April 6, 2025). DOI: 10.17223/19988613/75/2. EDN: CYBOXB (In Russian)
7. *Tsarev V.I. Grinberg Yu.I.* Achinsk: Urban Development History. Krasnoyarsk: Sroyizdat, 1992. 120 p. EDN: FTWEYP (In Russian)
8. *Gorbachev V.T., Kradin N.N., Kradin N.P., Krushlinsky V.I., Stepanskaya T.M., Tsarev V.I. (Ed.)* Urban Planning of Siberia. Saint-Petersburg: Kolo, 2011. 784 p. (In Russian)
9. *Kiskidosova T.A.* Trade and Industrial Entrepreneurship in the Yenisei Province in the 19th and Early 20th Centuries (Based on the Achinsk–Minusinsk Region). PhD Thesis, 2006. 207 p. EDN: NOGJWZ (In Russian)
10. *Kiskidosova T.A.* Cities of the Yenisei Province in the 19th and Early 20th Centuries (Based on Siberian Newspapers). Krasnoyarsk: Offset, 2023. 432 p. ISBN: 978-5-605-07940-8 EDN: OEBRBQ (In Russian)
11. *Fedorova V.I.* Yenisei Province 1861–1917: Economy. Society. Culture. Krasnoyarsk: Astafiev Krasnoyarsk State Pedagogical University, 2016. 344 p. ISBN: 978-5-00102-031-8 EDN: XIQROL (In Russian)
12. *Ivanova Yu.A., Sitnikova E.V.* Industrial Complexes of Merchant D.I. Smolin in the Historical Development of Kurgan. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (3): 9–19. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-9-19. EDN: QWFUZS (In Russian)
13. *Elizarova V.I., Korenev V.I.* Industrial Facilities in Tomsk Planning Structure in the 17th and Early 20th Centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (6): 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-9-23. (In Russian)
14. *Latysheva K.G., Tsarev V.I.* Design of Small Factories in the Yenisei Province in the 19th Century. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; (4): 44–56. EDN: NVGYMM (accessed: April 6, 2025). (In Russian)
15. *List of Factories and Plants of the Russian Empire in 1910.* 2nd edn. Moscow, Leningrad: Metul and Co., 1912. 1034 p. (In Russian)

16. Varzar V.E. (Ed.) List of Factories and Plants of the Russian Empire: Based on Official Data of the Industry Dept. of the Ministry of Trade and Industry. Saint-Petersburg: V.F. Kirshbaum Printing House, 1912. 720 p. (In Russian)
17. Ezyoransky L.K. Factory and Plant Enterprises of the Russian Empire (Excluding Finland). Compiled Under the Guidance of the Editorial Committee of the Council of Congresses of Representatives of Industry and Trade. F.A. Schober Ed. 2nd edn. Petrograd: Publ. by engineer D.P. Kandaurov and Son, 1914. [1612] p. (In Russian)
18. Latkin N.V. Yenisei Province: Its Past and Present. Saint-Petersburg: V.A. Tikhonov Printing House, 1892. 467 p. (In Russian)
19. Glass factory in Znamensk. In: Encyclopedia of the Krasnoyarsk Territory: Available: <https://my.krskstate.ru/docs/building/znamenskiy-stekolnyy-zavod/> (In Russian)
20. Brief Description of the Parishes of the Yenisei Diocese. Krasnoyarsk: Diocesan Brotherhood El. Printing House, 1916. 243 p. (In Russian)
21. State Archive of the Krasnoyarsk Territory, F. 31, Inv. 1, File 107. Correspondence with the Department of Internal Trade on the activities of the province's factories and plants. 1888. (In Russian)
22. Krasnoyarsk Regional Museum of Local Lore, Inv/F 9957/3. Project for the relocation of a wooden house and wing on a plot owned by 2nd guild merchant Gennady Vasilyevich Yudin in the city of Krasnoyarsk beyond the Kacha River. Territory of the 'Vienna' beer and mead brewery of merchant G.V. Yudin. 1881. (In Russian)
23. Krasnoyarsk Regional Museum of Local Lore, General photo collection. (In Russian)
24. Krasnoyarsk Regional Museum of Local Lore, Inv/F 3562/66. Project for building a school for workers' children at the Znamensky glass factory of the Danilov brothers near Krasnoyarsk. Designed by technician N.A. Peterikov. 1910. (In Russian)
25. Krasnoyarsk Regional Museum of Local Lore, Inv/F 3562/70. Plan of the Znamensky glass factory estate in the village of 'In Memory of the 13 Fighters', Yemelyanovsky District. 1920s. (In Russian)
26. Municipal Archive of the City of Achinsk, F. 9, Inv. 1, File 19. Economic characteristics of the city of Achinsk. (In Russian)
27. Kargopolov D.S. Achinsk Museum of Local Lore, General photo collection. (In Russian)
28. Achinsk Municipal Archive, F. 22, Inv. 1, File 106. Insurance register of private buildings in Achinsk for 1916. (In Russian)
29. Krasnoyarsk Regional Museum of Local Lore, O/F 9583. Adamovich T.A. Project for the construction of a leather factory for the Lazebnikov Brothers Partnership in the city of Achinsk. 1918. (In Russian)

Сведения об авторе

Прислонова Дарья Валерьевна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, dasha.prislonova@yandex.ru

Author Details

Darya V. Prislouova, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, dasha.prislaonova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16.04.2025
Одобрена после рецензирования 27.05.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 16.04.2025
Approved after review 27.05.2025
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 81–94.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 81–94.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036.4(470.11)

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-81-94

EDN: GBQTEH

ОСОБЕННОСТИ РЕГИОНАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XIX – НАЧАЛА XX ВЕКА

Елена Александровна Кулешова¹, Елена Юрьевна Орлова²,
Александр Петрович Герасимов¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

²Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина,
г. Москва, Россия

Аннотация. Актуальность. Современный взгляд на деревянную архитектуры требует не только инновационного подхода к проектированию, но и внимательного отношения к ее историческому и культурному наследию. В условиях глобализации актуальным становится сохранение и воспроизводство экологически благоприятной среды обитания человека, что невозможно без учета традиций и особенностей конкретного региона. Одним из основных направлений настоящего исследования является изучение «русского стиля» в архитектуре городов Западной Сибири второй половины XIX – начала XX столетия. Данная тема приобретает особое значение, поскольку позволяет понять, как разнообразие и богатство русской культуры могут быть использованы для создания комфортной среды жизнедеятельности человека.

Цель исследования заключается в выявлении особенностей «русского стиля» в деревянной архитектуре Западной Сибири, его роли в формировании предпосылок современного использования деревянной архитектуры, что позволит глубже понять взаимосвязь между общероссийскими тенденциями и региональными особенностями деревянного зодчества.

Методы работы включали историко-архитектурный анализ, сравнительное изучение проектных решений и их реализации. Были использованы материалы из альбомов проектов, архивные данные и визуальный анализ сохранившихся памятников архитектуры.

Результаты исследования показали, что архитекторы Западной Сибири творчески перерабатывали общероссийские идеи, сочетая принципы модерна, эклектики и национально-романтических традиций. Это позволило создать уникальную архитектурную идентичность региона, в котором народные элементы соседствовали с современными художественными решениями.

Ключевые слова: деревянная архитектура, Западная Сибирь, «русский стиль», формы и принципы развития архитектурного стиля, «неорусский стиль»

Для цитирования: Кулешова Е.А., Орлова Е.Ю., Герасимов А.П. Особенности региональной архитектуры Западной Сибири второй половины XIX – начала XX века // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного

университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 81–94. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-81-94. EDN: GBQTEH

ORIGINAL ARTICLE

REGIONAL ARCHITECTURE IN WESTERN SIBERIA LATE IN THE 19th AND EARLY 20th CENTURIES

Elena A. Kuleshova¹, Elena Yu. Orlova², Aleksandr P. Gerasimov¹

¹*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

²*Kosygin Russian State University, Moscow, Russia*

Abstract. The contemporary perspective on wooden architecture requires not only an innovative approach to design, but also careful attention to its historical and cultural heritage. In the context of globalization, the preservation and reproduction of an ecologically favorable living environment for people becomes particularly relevant, which is impossible without considering the traditions and specific characteristics of the region. One of the main directions of this research is the Russian architectural style in Western Siberia cities late in the 19th and early 20th centuries. This topic is of particular importance, as it helps to understand how the diversity and richness of the Russian culture can be utilized to create a comfortable living environment.

Purpose: Identification of the Russian architectural style features in the wooden architecture of Western Siberia and its role in prerequisites for the modern use of wooden architecture. This allows for a deeper understanding of the relationship between all-Russian trends and regional specifics of wooden construction.

Methodology: The historical-architectural analysis, comparative analysis of design solutions and their implementation. Materials from project albums, archival documents, and visual analysis of preserved architectural monuments were used.

Research findings: It is shown that architects in Western Siberia creatively interpret all-Russian ideas, combining principles of modernism, eclecticism, and national-romantic traditions. This allows them to create a unique architectural identity for the region, where folk elements coexist with contemporary artistic solutions.

Keywords: wooden architecture, Western Siberia, Russian architectural style, architectural style development, neo-Russian style

For citation: Kuleshova E.A., Orlova E.Yu., Gerasimov A.P. Regional Architecture in Western Siberia Late in the 19th and Early 20th Centuries. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 81–94. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-81-94. EDN: GBQTEH

Введение

В деревянной архитектуре городов Западной Сибири, начиная со второй половины XIX в., сформировались региональные особенности, существенно отличающиеся от архитектурных традиций других регионов России. С начала века прекращается стихийная застройка городских кварталов, происходит плановое строительство деревянных домов. В этот период широко используются типовые проекты с однообразно оформленными фасадами. Однако уже во второй половине XIX в. внешний облик деревянного жилого дома постепенно начинает меняться. Все больше проявляется тенденция не только к декоративному украшению фасадов, ведущая свое начало от народных обычаев, но и к поиску и фор-

мированию своих национальных форм и орнаментов в зодчестве. Эти поиски национальной идентичности нашли свое отражение в концепции «русского стиля», которая объединила различные подходы и представления о традиционной архитектуре России.

В настоящем исследовании «русский стиль» рассматривается как форма выражения национального самосознания через искусство, где соотношение «нация – мир» или «нация в мире» является основополагающей для русской культуры. Теоретические основы «русского стиля» были сформулированы в XIX в. историком И.Е. Забелиным и критиком В.В. Стасовым. Они основаны на признании самобытности русского национального искусства. Особенности государственного устройства, история, культура и быт народа рассматриваются здесь как факторы, определяющие развитие архитектуры. Первозлементом этой системы, по И.Е. Забелину [1], является крестьянская изба-клеть, символизирующая самобытный характер русской народности. Богатство России деревом, мягким и податливым строительным материалом, сформировало структуру русского города, впоследствии получившую название «древнерусское зодчество». При этом древнерусская архитектура органично соединялась с естественностью народного искусства и символикой славянской культуры [2].

Специфика развития и формирование «русского стиля»

С появлением стилевой каменной архитектуры в городах Западной Сибири происходит использование ее элементов в деревянных домах и взаимодействие различных художественных стилей. Такие направления, как барокко и классицизм, существенно повлияли не только на орнамент, но и на формирование городского деревянного дома. В городах появляются усадьбы почти всех сословий горожан, из дерева строятся общественные здания: школы, больницы, приюты и т. п.

С развитием типовых проектов постепенно происходит распространение официальной версии «русского стиля». Однако строительство ведется не путем прямого копирования, а с учетом местной специфики и вкусовых предпочтений. Монументальная архитектура Сибири, исторически тесно связанная с общерусскими традициями, отражает и особенности социально-экономической жизни региона. Значительная территориальная протяженность и специфика природно-климатических условий способствовали формированию уникальных черт местной архитектуры. Именно здесь сохранились традиции древнерусского деревянного зодчества [2].

Период эклектики, охватывающий середину – вторую половину XIX в., характеризуется доминированием тенденции «свободного выбора» стилевых решений. Архитекторы А.М. Горностаев, В.А. Гартман, Н.В. Никитин, А.Л. Гун, И.П. Ропет, К.К. Лыгин начинают активно разрабатывать графические варианты декоративных элементов на основе народного орнамента. Созданный архитекторами и художниками «русский стиль» оказал значительное влияние на архитектуру Западной Сибири. Основную роль в популяризации «русского стиля» сыграл журнал «Мотивы русской архитектуры» (1873–1880 гг.), который стал источником вдохновения для сибирских архитекторов [3, 4] (рис. 1).

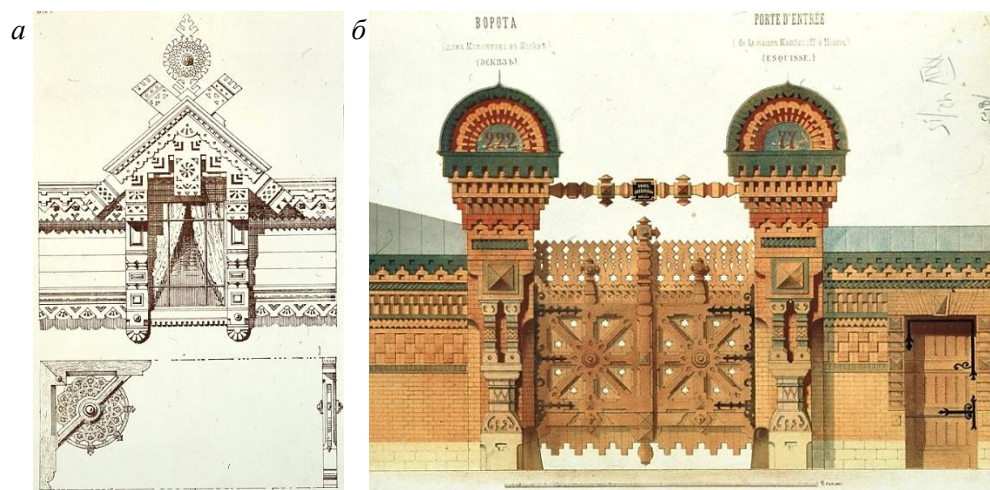


Рис. 1. Репродукции из журнала «Мотивы русской архитектуры»¹:
а – наличник окна; б – ворота

Fig. 1. Reproductions from the magazine "Motives of Russian Architecture":
a – window frame; b – gate

«Русский стиль», изначально рассматриваемый как национально-романтическое явление в архитектуре периода эклектики, получил дальнейшее развитие в городах Западной Сибири. При этом наиболее ярко здесь проявляется тенденция слияния барочных, классических и народных орнаментов, что привело к созданию нового направления в деревянной архитектуре, получившего название принципа «2-го фольклора». Архитекторы Сибири активно участвуют в разработке вариантов орнаментики для деревянных домов, создавая сложный орнамент, порой не поддающийся однозначной интерпретации. Например, орнамент надоконной доски наличников в Томске, который можно трактовать как воплощение древних символов «древо жизни» или «переплут» [4, 5] (рис. 2).

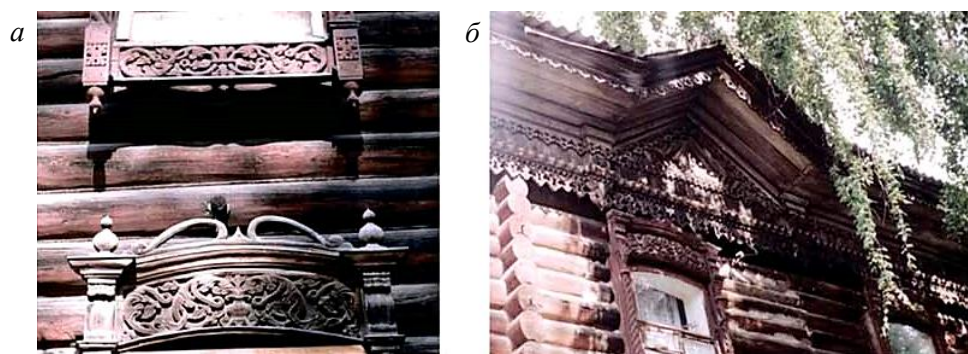


Рис. 2. Фрагмент главного фасада (а) дома на ул. Дзержинского, 4 (ул. Преображенская); фрагмент наличника к. XIX – нач. XX в. (б). Томск, 2004 г. [4]

Fig. 2. A fragment of the main facade (a) of the house on Dzerzhinsky Street, 4 (Preobrazhenskaya Street) and an architrave fragment of the 19–20th centuries (b). Tomsk, 2004

¹ URL: https://dzen.ru/a/ZQmU8dr9_FyWJec0

В начале XX столетия «русский стиль» получил новый импульс в развитии городской деревянной архитектуры. Модерн, сменивший эпоху исторических стилей, получил совершенно новое развитие в городской архитектуре. Как отмечают исследователи модерна, из комплекса проблем, связанных с современным этапом изучения архитектуры к. XIX – начала XX в., необходимо выделить три проблемы, образующие основу исследовательской задачи. Во-первых, это вопрос общего терминологического определения архитектуры указанного периода. Во-вторых, необходимость классификации ее направлений. В-третьих, анализ отношения архитектуры этого времени к предшествовавшему и последующему этапам ее развития, т. е. ее историческое место в контексте российской культуры.

Национальная проблема в начале XX столетия не потеряла своей актуальности, а продолжала развиваться в новых формах. В столичных изданиях регулярно выходили книги и альбомы с новыми планами и проектами (рис. 3, 4).



Рис. 3. В. Минетти. Деревянная архитектура. Фасады и детали внешней архитектуры: а – обложка; б – фрагмент деревянного дома [6]

Fig. 3. V. Minetti wooden architecture. Facades and details of external architecture: а – cover; b – fragment of a wooden house

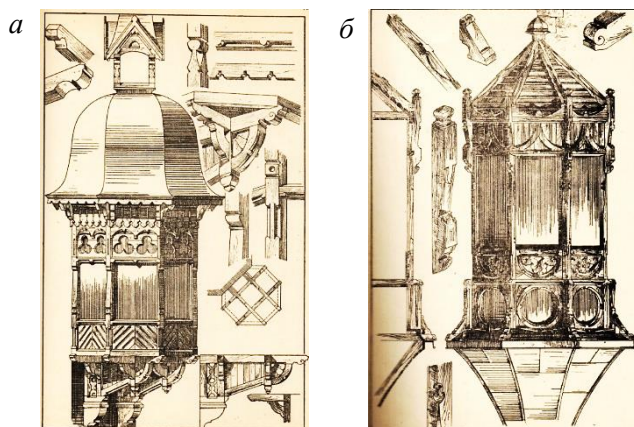


Рис. 4. Фрагменты деревянной архитектуры: варианты эркера [6]

Fig. 4. Fragments of wooden architecture: bay windows

Новое направление в начале XX столетия окончательно утвердилось в архитектуре городов Западной Сибири, что подтверждается многочисленными примерами каменных и деревянных зданий в таких городах, как Барнаул, Тобольск, Тюмень, Томск (рис. 5).



Рис. 5. Дом А.А. Лесневского. Барнаул. Начало XX в.²:

a – общий вид; *б* – фрагмент центрального аттика

Fig. 5. A.A. Lesnevsky's house in Barnaul. Beginning of the 20th century:

a – general view; *b* – central attic

Направление модерна в деревянной архитектуре

Направление модерна в деревянной архитектуре выразилось в поисках архитекторами новых форм в конструкциях деревянных домов и орнаментике, которые существенно отличаются от форм деревянной архитектуры XIX в. Именно в это время утвердилось новое направление в российской архитектуре – «неорусский стиль», который сочетает элементы древнерусского зодчества с новыми художественными тенденциями. Элементы «русского стиля» нашли широкое применение во всех частных и деревянных домах 2-й пол. XIX в. Особое настроение создает «новосмирновская» дача купца И.В. Смирнова (рис. 6). Свободная трактовка плана и объемно-пространственной композиции, орнаментальное исполнение фасадов ставит деревянную дачу купца, построенную в к. XIX – начале XX в., на высочайший уровень исполнения деревянных домов. Проектируя здание в сосновом бору, вблизи р. Томи, автор ориентировался на круговое обозрение со всех четырех сторон. Фасады, украшенные балконами, башнями и башенками, эркерами, большими фронтонами со шпилями, создавали образ сказочного дворца. Одновременно с этим декоративное решение отличается скромностью: строгие орнаменты оконных обрамлений, пилястр, гладкого фриза, акцентированного только кронштейнами, – свойства, характерные для «нового стиля». Оригинальная планировка, уникальность архитектурных форм, необычайная целостность форм фасадов создают единство с окружающей средой, подчеркивают черты модерна. Купец первой гильдии Иван Васильевич Смирнов имел обширные торговые заведения на Миллионной улице, а также свой особняк в Приюто-Духовском переулке

² URL: <https://barnaulheritage.ru/bu/159-polzunova-56>

(пер. Совпартшкольный), построенный в 1916 г. в стиле неоклассицизм городским архитектором П.Ф. Федоровским. Однако именно в загородной даче купца И.В. Смирнова наиболее полно выразилась неоромантическая тенденция, характерная для загородного строительства. В отличие от А.А. Оля, который при возведении дачи Леонида Андреева в Райволе (1900 г.) исходил из традиции рубленого крестьянского жилища, сибирский архитектор создал уникальное решение: фон рубленого дома подчеркивает легкость и ажурность веранды, террасы и балкона, формируя впечатление сказочного дворца (рис. 6).



Рис. 6. Дача купца И.В. Смирнова. Архитектор П.Ф. Федоровский (?). Конец XIX – начало XX в. Фото А.П. Герасимова, 1995 г.

Fig. 6. Dacha of merchant I.V. Smirnov. Architect P.F. Fedorovsky (?). The 19–20th centuries. Photo by A.P. Gerasimov, 1995

Переход к объемно-активной композиции происходит в двух особняках, расположенных в пер. Плеханова, 5 (рис. 7). Асимметрия главного фасада уравновешивается двумя фронтонами, расположенными над эркером главного входа и ризалитом правой стороны. Восьмигранная башня с фонарем, возвы-

шающаяся над эркером, приближает его к тем русским храмам, которые строили на Севере России. Строгие в орнаментальном оформлении наличники, треугольные навершия надоконных досок и полуциркульные нижние завершения в виде полусолнц отображают русские народные традиции. Похожее решение конструкции башни и аналогичное завершение в виде фонаря наблюдаются и в доме № 6 по Кузнечному взвозу. С другой стороны, автор построек использует классические элементы в оформлении оконных обрамлений и применяет треугольные фронтоны в оформлении крыши дома. Используя элементы каменного зодчества, вводит в конструкцию дома шестигранную башню с фонарем, во фронтоне применяет украшение в виде шпилей, что характерно для «русского стиля» второй половины XIX в. Оба дома объединяет живописное единство в оформлении фасадов, заключающееся в выделении узловых соединений сруба пилястрами. Архитектурно-планировочная структура этих особняков аналогична двухэтажным доходным домам.



Рис. 7. Томск. Особняк на ул. Плеханова, 5 (быв. Монастырский пер.). Начало XX в.³
Fig. 7. Mansion on Plekhanov Street, 5 (former Monastyrsky Lane), Tomsk. Beginning of the 20th century

³ Деревянная архитектура Томска / сост. Ю.И. Шепелев, З.А. Зайцева. Москва: Советский художник, 1987.

Альбомы с проектами и расчетами стоимости строительства, такие как работы В. Стори или В. Минетти, нельзя непосредственно сравнивать с архитектурой городов Западной Сибири. Однако рациональные идеи, заложенные в изданиях, сибирские архитекторы, творчески перерабатывая, активно использовали в своих проектах. Так, архитектором В.Ф. Оржешко в 1908 г. был построен особняк на ул. Гагарина, 42 (быв. ул. Дворянская), где сочетание принципа модерна «изнутри наружу», асимметрия форм главного фасада и включение древнерусского шлемовидного купола над левой частью дома создают ассоциации с древнерусскими княжескими теремами (рис. 8). Композиция дома-особняка подчинена его интерьеру и решена в свободной манере построения объемов.

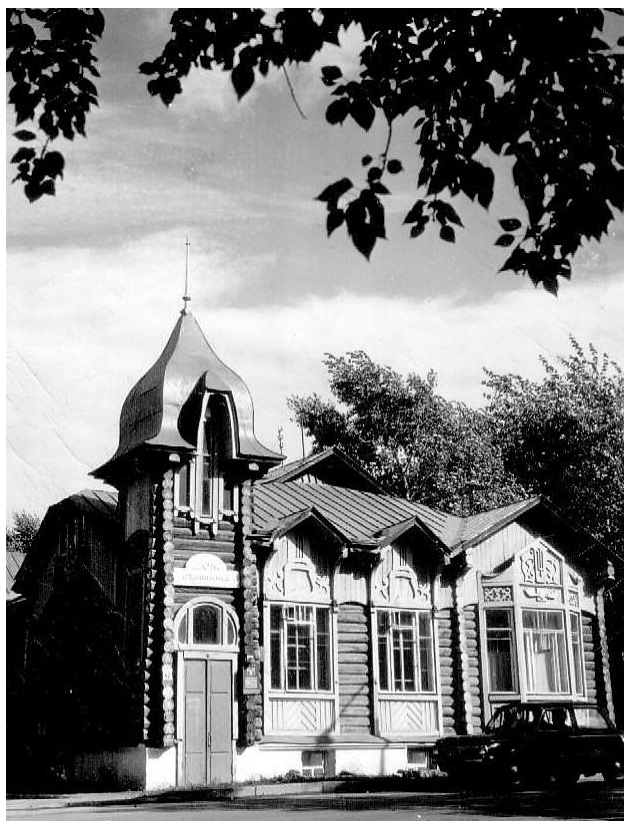


Рис. 8. Томск. Особняк на ул. Гагарина, 42 (быв. ул. Дворянская). Архитектор В.Ф. Оржешко. 1908 г. Фото А. Райха

Fig. 8. Mansion on the street Gagarina, 42 (formerly Dvoryanskaya St.), Tomsk. Architect V.F. Orzheshko. Photo by A. Reich, 1908

Русский модерн, зародившийся в России на рубеже XIX–XX столетий, стал совершенно новым явлением в мировой архитектуре. Окончательно утвердившись в 90-е гг. XIX в., он получил широкое распространение по всем регионам России. Е.И. Кириченко отмечает: «В России поиски новых путей в искусстве концентрируются в Петербурге и Москве. Тесная взаимосвязь крупнейших

в России центров художественной культуры не исключала известных параллелей в эстетических установках формировавшихся объединений художников, составивших круг представителей русского модерна. Если в Петербурге, в большей степени, проявились общероссийские тенденции нового искусства, то в Москве преимущественное развитие получили национальные традиции, перерабатываемые в соответствии с новым эстетическим идеалом...» [7]. Это высказывание в большей степени относится к каменной архитектуре, однако оно также применимо для анализа деревянной архитектуры городов Западной Сибири.

Необходимо еще раз отметить причины появления «нового стиля». Это явление в большей или меньшей степени проявилось во всех регионах, в том числе и в городах Сибири, став всероссийским. Стилистическое многообразие модерна характерно как для каменной архитектуры, так и для деревянного зодчества. Большая часть деревянных зданий, рассматриваемых выше, отражают влияние неоромантических тенденций, внутри которых существовали различные направления. Тип дома-особняка, получивший распространение во второй половине XIX в. в Англии, был широко подхвачен многими странами Европы. Это направление укоренилось и в России, охватывая все регионы. Кроме того, модерн в деревянной архитектуре Сибири обнаруживает черты, которые некоторые исследователи выделяют в особую группу фольклористического направления, возникшего как в архитектуре Скандинавских стран, так и в России (рис. 9).

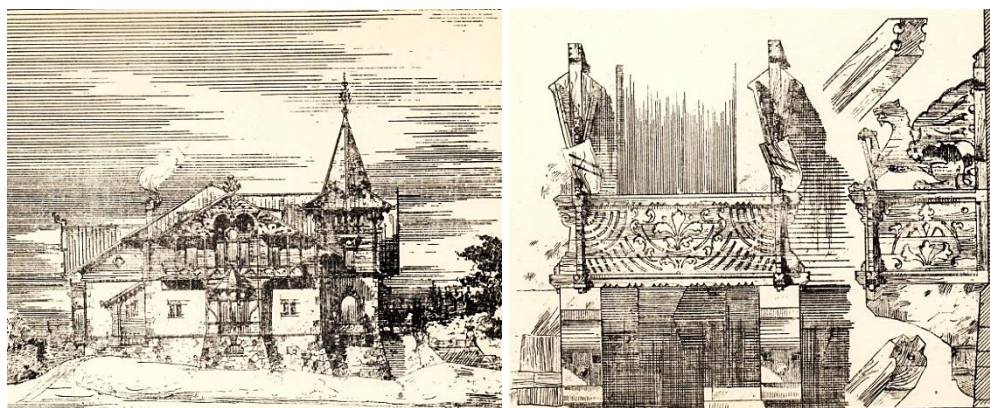


Рис. 9. В. Минетти. Деревянная архитектура. Фасады и детали внешней архитектуры. Санкт-Петербург, 1911 г. [6]

Fig. 9. V. Minetti. Wooden architecture. Facades and details of external architecture. Saint-Petersburg, 1911 [6]

Широкое строительство особняков, дач и домов-усадьб в Сибири дает основание говорить о многообразии и своеобразной интерпретации этих типов построек (рис. 10). Важно отметить, что культовая архитектура также играла значительную роль в развитии региональных традиций. Несмотря на определенные каноны православия, в начале XX столетия многообразие решений деревянных церквей достигает своей вершины. Так, богатством форм отличается храм, построенный в Новониколаевске (рис. 11).



Рис. 10. Томск. Дом на ул. Тверской, 66. 1899 г. (а) Фото А.П. Герасимова. 1996 г.;
Тобольск. Народный дом. 2-я пол. XIX в.⁴ (б)

Fig. 10. House on Tverskaya Street, 66. 1899, Tomsk (a), Photo by A.P. Gerasimov, 1996;
People's House in Tobolsk. 2nd half of the 19th century (b)



Рис. 11. Новосибирск (Новониколаевск). Знаменская церковь. 1907 г.⁵
Fig. 11. Novosibirsk (Novonikolaevsk). Znamenskaya Church. 1907

⁴ URL: <http://nashtobolsk.ru/starinnye-otkrytki-s-izobrazheniem-tobolska-19v>

⁵ URL: <http://www.pravoslavie.ru/97492.html>

К концу XIX в. в Сибири был накоплен внушительный опыт деревянного строительства, который активно использовался профессиональными архитекторами региона (П.Ф. Федоровский, С.В. Хомич, А.Д. Крячков, В.Ф. Оржешко, К.К. Лыгин и др.). По мнению В.С. Горюнова и М.П. Тубли, материал как формообразующий фактор в концепции эклектики и модерна играл одну из решающих ролей. Зародившись как стиль в каменном зодчестве, модерн одновременно получил развитие в железобетоне и дереве. Исследователи выделяют в особую группу это направление в архитектуре, которое опиралось «на традицию рубленого дерева крестьянского жилища» [8].

Применение общей для архитектуры этих направлений конструкции бревенчатого сруба создавало определенную стилистическую общность. Этому также способствовала характерная для неоромантического направления модерна идеализация примитива и «народной» простоты. В этой связи важно отметить, что стилистика рубленого дома, как любая оформившаяся стилистика, легко эмансипировалась от весьма специфических условий, которыми она была порождена. «Свидетельство тому – многочисленные выставочные павильоны северных европейских стран, в том числе и России, выполненные с применением бревенчатого сруба...» [Там же].

Заключение

Делая некоторые выводы, необходимо отметить, что теоретические воззрения о русской национальной деревянной архитектуре нашли отражение в практической деятельности архитекторов в городах Западной Сибири. Исследование показало, что деревянная архитектура городов Западной Сибири второй половины XIX – начала XX в. представляет собой уникальный феномен, отражающий сложное переплетение общерусских традиций и местных особенностей, и является важным этапом в развитии русского зодчества. Формирование «русского стиля» в этот период происходило под влиянием национально-романтических идей, эклектики и модерна. Однако, несмотря это, в архитектуре Западной Сибири оформились свои взгляды и традиции, сочетающие элементы народного зодчества, классицизма, барокко и новых художественных направлений. Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего изучения региональных особенностей архитектуры и сохранения культурного наследия России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Забелин И.Е. Русское искусство: Черты самобытности в древнерусском зодчестве. Москва : Грассман и Кнебель, 1900. 160 с.
2. Орлова Е.Ю. «Русский стиль» в архитектуре и национальной культуре России (XVI–XX вв.) : специальность 17.00.04. «Изобразительное искусство, декоративно-прикладное искусство и архитектура» : автореферат на соискание ученой степени кандидата искусствоведения. Новосибирск, 2009. 24 с.
3. Герасимов А.П. Архитектура барокко в Западной Сибири // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 9–24. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-9-24. EDN: BMVRIV
4. Герасимов А.П. Русский стиль в деревянной архитектуре Западной Сибири // Архитектон: известия вузов. 2019. № 1 (65). С. 8. EDN OOPUQD

5. Ситникова Е.В. Деревянная архитектура Томска второй половины XIX – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 1. С. 59–65. EDN: LVSEMY. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/derevyannaya-arhitektura-tomska-vtoroy-pолоviny-hih-nachala-hh-v> (дата обращения: 14.04.2025).
6. Минетти В. Деревянная архитектура. Фасады и детали внешней архитектуры. Санкт-Петербург, 1911.
7. Кириченко Е.И. Русская архитектура 1830–1910-х годов. Москва : Искусство, 1978. 399 с.
8. Горюнов В.С., Тубли М.П. Архитектура эпохи модерна. Концепции. Направления. Мастера. Санкт-Петербург : Стройиздат, 1994. 360 с.

REFERENCES

1. Zabelin I.E. Russian Art: Specific Ancient Russian Architecture. Moscow: Grassman i Knebel', 1900. 160 p. (In Russian)
2. Orlova E.Yu. Russian Architectural Style and National Culture (16th–20th centuries). PhD Abstract. Novosibirsk, 2009. 24 p. (In Russian)
3. Gerasimov A.P. Baroque Architecture in West Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (4): 9–24. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-9-24. EDN: BMVRIV (In Russian)
4. Gerasimov A.P. Russian Style in Wooden Architecture of Western Siberia. *Arkhiteton: izvestiya vuzov*. 2019; 1 (65): 8. EDN OOPUQD (In Russian)
5. Sitnikova E.V. Wooden Architecture of Tomsk Late in the 19th and Early 20th Centuries. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011; (1): 59–65. EDN: LVSEMY. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/derevyannaya-arhitektura-tomska-vtoroy-pолоviny-hih-nachala-hh-v> (data obrashcheniya: 14.04.2025). (In Russian)
6. Minetti V. Wooden Architecture. Facades and Details of External Architecture. Saint-Petersburg, 1911. (In Russian)
7. Kirichenko E.I. Russian Architecture of the 1830–1910s. Moscow: Iskusstvo, 1978. 399 p. (In Russian)
8. Goryunov V.S., Tubli M.P. Architecture of the Art Nouveau Era. Concepts. Directions. Masters. Saint-Petersburg: Stroyizdat, 1994. 360 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Кулешова Елена Александровна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kulesova@tsuab.ru

Орлова Елена Юрьевна, канд. искусствоведения, доцент, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 117997, г. Москва, Садовническая ул., 35, elenaorlovva8@gmail.com

Герасимов Александр Петрович, канд. искусствоведения, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gerasimoffali4ksandr@yandex.ru

Authors Details

Elena A. Kuleshova, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kulesova@tsuab.ru

Elena Yu. Orlova, PhD, A/Professor, Kosygin Russian State University, 1, Malaya Kaluzhskaya Str., Bild. 3, Moscow, Russia, elenaorlovva8@gmail.com

Aleksandr P. Gerasimov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gerasimoffali4ksandr@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.05.2025
Одобрена после рецензирования 10.06.2025
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 27.05.2025
Approved after review 10.06.2025
Accepted for publication 26.06.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 95–108.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 95–108.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 692.299:69.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-95-108

EDN: RIJNBG

СПОСОБ УСИЛЕНИЯ И РАСЧЕТ ОСЛАБЛЕННЫХ УЧАСТКОВ НЕСУЩИХ СТЕН ПРИ УСТРОЙСТВЕ В НИХ НОВЫХ ПРОЕМОВ

Эрес Кечил-оолович Опбул^{1,2}, Гурий Николаевич Ширунов³,
Анай-Хаак Бугалдаевна Калдар-оол², Евгений Эдуардович Намчыл¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

²Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Россия

³Военный институт (инженерно-технический) Военной академии
материально-технического обеспечения имени генерала армии
А.В. Хрулева, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследуется оригинальный способ усиления и расчет внутренних несущих стен, ослабленных при устройстве в них новых проемов в процессе перепланировки или реконструкции квартир старой постройки.

Цель работы. Разработка способа усиления несущих стен для обеспечения безаварийной эксплуатации несущих конструкций в существующих зданиях и сооружениях.

Научная новизна исследования заключается в предложении метода усиления участков внутренней несущей стены над вырезаемым проемом с использованием двусторонней обоеймы из углепластиковых армированных холстов (лент), а также расчет требуемого сечения используемых материалов.

Методы исследования включают создание комбинированной конструкции на основе наклейки двусторонней обоеймы из углепластиковых армированных холстов (лент) и определение их требуемой площади сечения на основе равенства несущей способности ленты и недостающей (вырезанной) продольной рабочей арматуры.

Результаты. Работоспособность предложенной комбинированной конструкции обоснована и подтверждена расчетом и внедрена в практику с 2016 г. Представленные решения могут быть полезны при усилении не только несущих стен, ослабленных установкой новых проемов, но и при усилении уже существующих оконных или дверных проемов.

Ключевые слова: проем, несущая стена, несущая способность, усиление, бетон, арматура, углепластиковая лента

Для цитирования: Опбул Э.К., Ширунов Г.Н., Калдар-оол А.-Х.Б., Намчыл Е.Э. Способ усиления и расчет ослабленных участков несущих стен при устройстве в них новых проемов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 95–108. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-95-108. EDN: RIJNBG

ORIGINAL ARTICLE

STRENGTH ANALYSIS AND METHOD OF LOAD-BEARING WALL AREAS LOOSEN BY INSTALLING NEW OPENINGS

Ehres K. Opbul^{1,2}, Gurii N. Shirunov³,
Anai-Khaak B. Kaldar-ool², Evgenii E. Namchil¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint-Petersburg, Russia

²Tuvan State University, Kyzyl, Russia

³The Saint Petersburg Military Engineering-Technical University (Nikolaevsky), Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The paper proposes the strength analysis of internal load-bearing walls loosen by the installation of new openings during the redevelopment (reconstruction) of apartments in an old building.

Purpose: The proposed method for strengthening load-bearing walls is developed to ensure further trouble-free operation of load-bearing structures of buildings.

Methodology/approach. The creation of combined structure based on gluing a double-sided frame made of carbon fiber reinforced canvases (tapes), including determination of their cross-sectional area based on the equality of the bearing capacity of the tape and missing (cut) longitudinal working reinforcement.

Research findings: The efficiency of the proposed combined structure for strengthening load-bearing walls is substantiated and confirmed by calculations and introduced into practice in 2016.

Practical implications: Research results can be used in strengthening not only load-bearing walls loosen by the installation of new openings, but also existing window or door openings.

Originality/value. It is possible to consider reinforcing a section of the internal load-bearing wall above the cut-out opening by gluing a double-sided clamp made of carbon fiber reinforced canvases (tapes) and calculating their required cross-section.

Keywords: opening, load-bearing wall, load-bearing capacity, reinforcement, concrete, carbon fiber tape

For citation: Opbul E.K., Shirunov G.N., Kaldar-ool A.-Kh.B., Namchyl E.E. Strength Analysis and Method of Load-Bearing Wall Areas Loosen by Installing New Openings. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 95–108. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-95-108. EDN: RIJNBG

Введение

Объектом исследования являются внутренние несущие стены, а предметом исследования – методы их усиления и расчет ослабленных внутренних несущих стен в результате устройства новых проемов.

Цель исследования – разработка эффективного способа усиления несущих конструкций на основе внешнего армирования углепластиковыми волокнами для обеспечения безаварийной эксплуатации зданий при возможной перепланировке или реконструкции квартир старой постройки.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработка плана перепланировки квартиры с учетом планируемых проемов.
2. Сбор нагрузок от вышележащих конструкций.
3. Выполнение численного расчета несущих стен с помощью метода конечных элементов на основе продукта SCAD для определения недостающей рабочей арматуры с учетом уже вырезанных проемов.
4. Определение требуемой площади поперечного сечения и длины анкеровки углепластиковых волокон.

Актуальность исследования обусловлена тем, что усиление несущих конструкций углеволокном имеет ряд преимуществ, определенных свойствами самого материала. В отличие от тяжелого металла углеволокно имеет небольшой собственный вес, долговечно, устойчиво к коррозии и агрессивной среде, характеризуется сокращением продолжительности работ.

Предлагаемый оригинальный метод усиления несущих внутренних стен был практически реализован после проведения технического обследования объекта авторами настоящей статьи в октябре 2016 г. в Санкт-Петербурге. Все работы проводились с соблюдением требований, приведенных в нормативных документах¹.

Согласно литературным данным [3], с 1950-х гг. начинается активное развитие усиления строительных конструкций методом внешнего армирования. Стальные стержни или листы (пластины), а также преднапряженные канаты приклеивались к поверхности железобетонных несущих элементов с помощью эффективных эпоксидных адгезивов.

В начале XXI в. стало широко распространено внешнее армирование строительных конструкций углепластиковыми материалами [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. В качестве армирующих элементов использовались высокопрочные композиционные материалы на основе специальных волокон, в особенности углеродных.

Пример применения системы внешнего армирования [8] для усиления строительных конструкций многоквартирного жилого дома отражает экономическую эффективность данного подхода. Сравнение технико-экономических показателей выявило следующие результаты:

1. Усиление конструкций жилого дома композитными материалами:
 - сметная стоимость усиления углеродной арматурой – 263,141 тыс. руб.;
 - сметная стоимость усиления углеродной тканью – 765,432 тыс. руб.
- Итого: 1028,573 тыс. руб.

¹ СП 13-102-2003. Свод правил по проектированию и строительству: Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений / Госстрой России. Москва: ФГУП ЦПП, 2004. 26 с.; ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Стандартинформ, 2010. 96 с.; СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Москва: Минстрой России, 2015. 50 с.

2. Усиление конструкций жилого дома металлом:

– сметная стоимость усиления металлической арматурой – 544,702 тыс. руб.;

– сметная стоимость усиления металлическими листами – 1048,641 тыс. руб.

Итого: 1 593,343 тыс. руб.

Вывод: использование композитных материалов обеспечивает экономию в размере 35 %, экономический эффект – 564,770 тыс. руб.

Алгоритм исследования состоит из следующих этапов:

– разработка плана переустройства квартир с указанием планируемых проемов;

– сбор нагрузок от вышележащих конструкций;

– численный анализ на основе конечно-элементной модели для определения количества требуемой продольной рабочей арматуры для внутренних несущих стен с учетом существующих проемов;

– расчет площади поперечного сечения углепластиковой ленты с эквивалентной несущей способностью для стержневой продольной арматуры;

– определение требуемой длины анкеровки углепластиковых волокон.

Результаты

Исследование проводилось на примере 6-этажного жилого дома с железобетонным монолитным каркасом и двуслойными каменными наружными стенами. Здание постройки 2008 г., по данным паспорта ПИБ. Реконструируемые квартиры расположены на 6-м этаже, высота этажа – 3,0 м. Самонесущие наружные стены на один этаж опираются на плиты междуэтажных перекрытий. Перемычки над оконными проемами скрытые, выполнены из железобетона. Междуэтажные перекрытия опираются на внутренние несущие железобетонные стены каркаса и отдельные монолитные колонны. Перегородки выполнены из блоков ячеистого бетона, в санузлах – из кирпича. План несущих конструкций и предполагаемых вновь организуемых и закладываемых проемов приведен на рис. 1.

Определение возможности устройства дополнительных проемов в несущих стенах выполнено путем поверочного расчета фрагмента здания, включающего верхний этаж на участке расположения обследуемых квартир. Расчет проведен на основе конечно-элементной модели, разработанной с использованием программного комплекса SCAD. Исходные данные для расчета приняты в соответствии с рабочими чертежами оригинального проекта ДС 3-3-Оз/03-П-ОПР и 3-Оз/03-П-КЖ-2.3.4: толщина плиты чердачного перекрытия составляет 18 см, толщина железобетонных стен – 16 см, модуль упругости принят равным $E_b = 28,5 \cdot 10^3$ МПа для бетона класса В22,5.

Нагрузка на плиту покрытия принята со значениями, собранными и представленными в табл. 1.

Собственный вес несущих элементов учитывался автоматически для заданных толщин элементов и плотности железобетона 2,5 т/м³. Для заданного расчетного сочетания усилий были определены необходимые параметры армирования стен в соответствии с требованиями действующих нормативных документов: СП 63.13330.2012 (Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003).

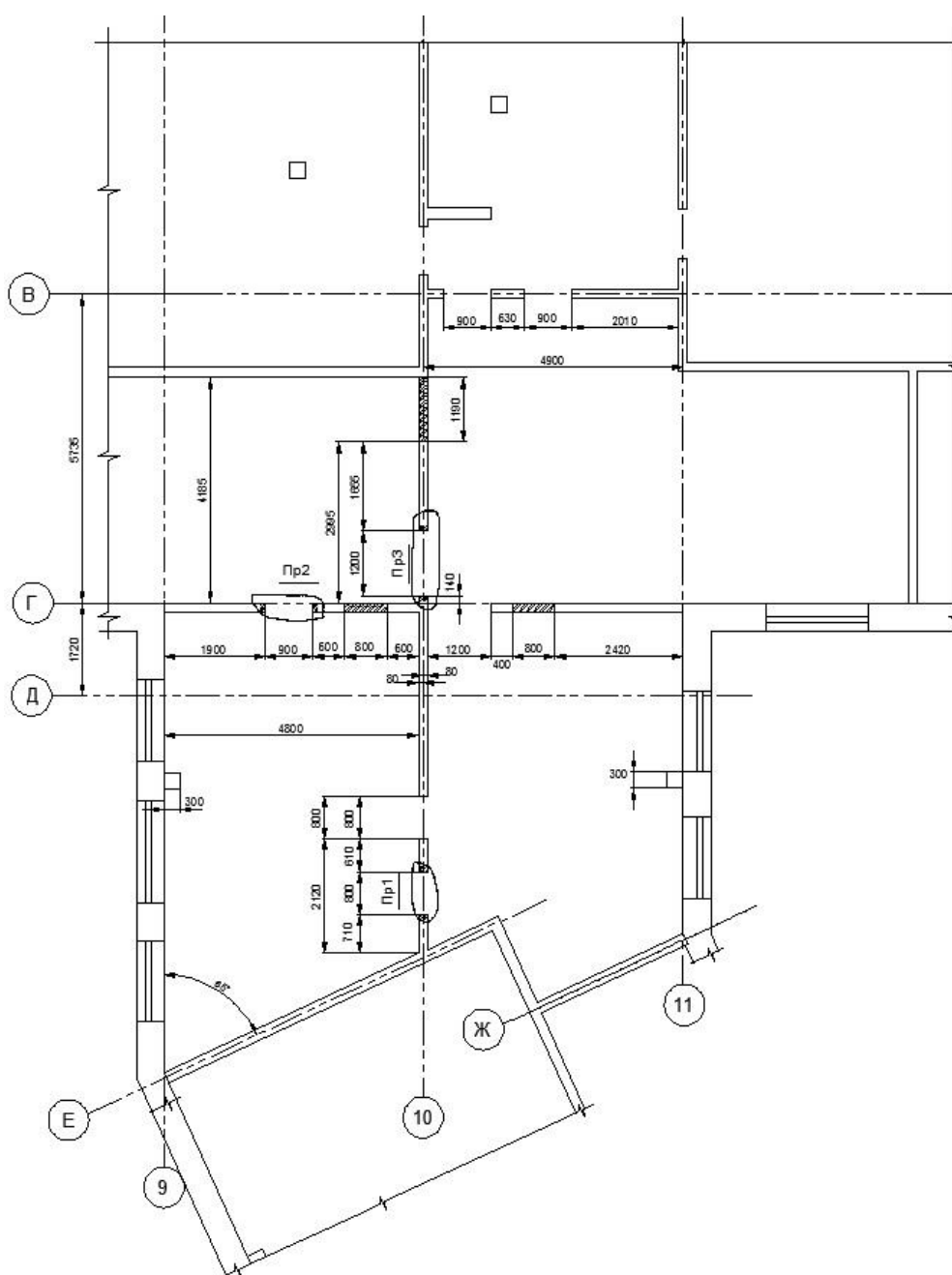


Рис. 1. План переустройства квартир:

Пр1, Пр2, Пр3 – планируемые для вырезки проемы

Fig. 1. Flat reconstruction plan:

Пр1, Пр2, Пр3 – openings to be cut

Расчетная схема фрагмента и конечно-элементная разбивка стен представлены на рис. 2, 3.

Таблица 1

Сбор нагрузок на покрытие

Table 1

Loads on the coating

№	Элемент	Толщина, м	Объемный вес, кгс/м ³	Нормативная нагрузка q^n , кг/м ²	γ_f	Расчетная нагрузка q , кг/м ²
1	Собственный вес крыши	—	—	50	1,1	55
2	Утеплитель чердачного перекрытия (минвата)	0,025	200	50	1,1	55
3	Пароизоляция	—	—	5	1,1	6
4	Временная на чердачное перекрытие (полезная)	—	—	70	1,3	91
5	Снеговая (без учета ската)	—	—	—	—	240
Итого				—		447

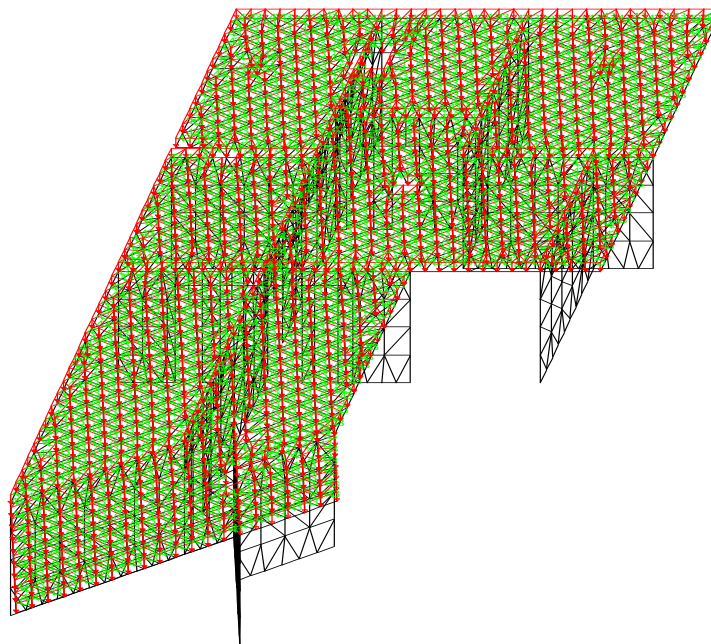


Рис. 2. Конечно-элементная модель фрагмента здания с обследуемыми квартирами

Fig. 2. FEM of building fragment with examined flats

В результате расчета получены следующие распределения необходимой рабочей арматуры для проемов ПР1, ПР2 и ПР3 (рис. 3–9), где значения приводятся по СП 52-103–2007 с учетом конструктивных требований².

² СП 52-103–2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий. Москва: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2007. 22 с.; СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Москва: Минстрой России, 2015. 50 с.

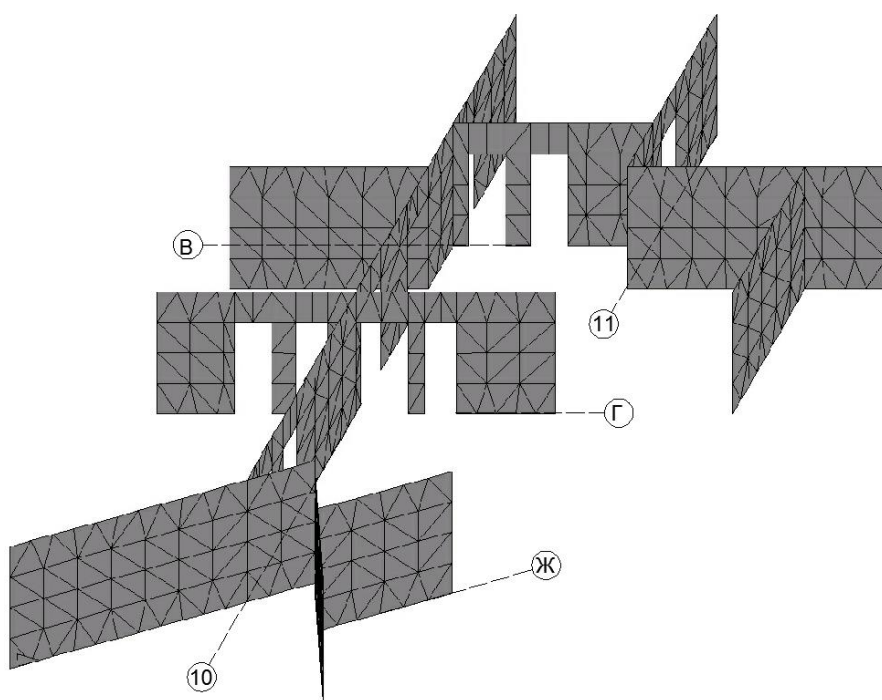


Рис. 3. Конечно-элементная разбивка стен
Fig. 3. FEM of walls

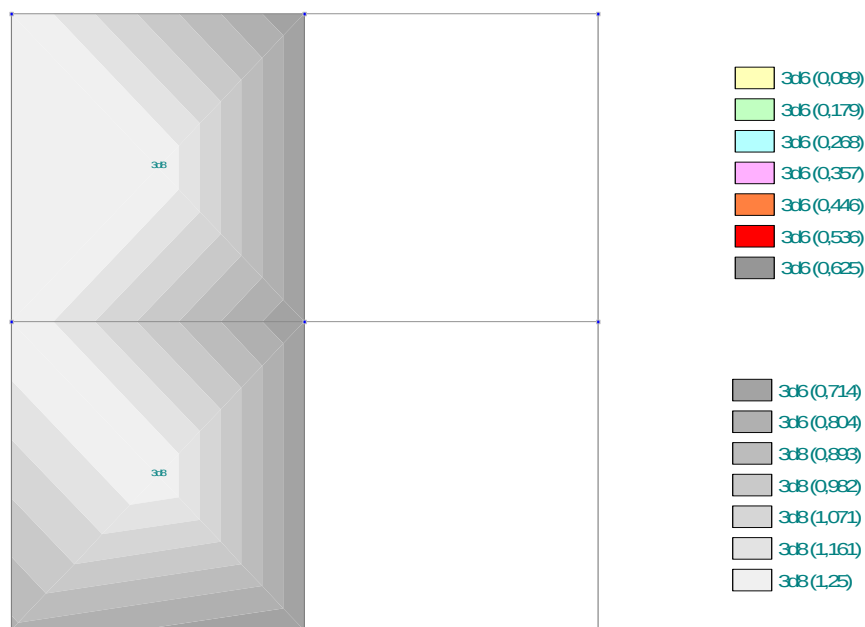


Рис. 4. Требуемая продольная рабочая горизонтальная (нижняя) арматура над проемом
ПП1, диаметр в мм (см²)
Fig. 4. Required longitudinal horizontal (lower) reinforcement over opening PP1, mm (cm²) Dia

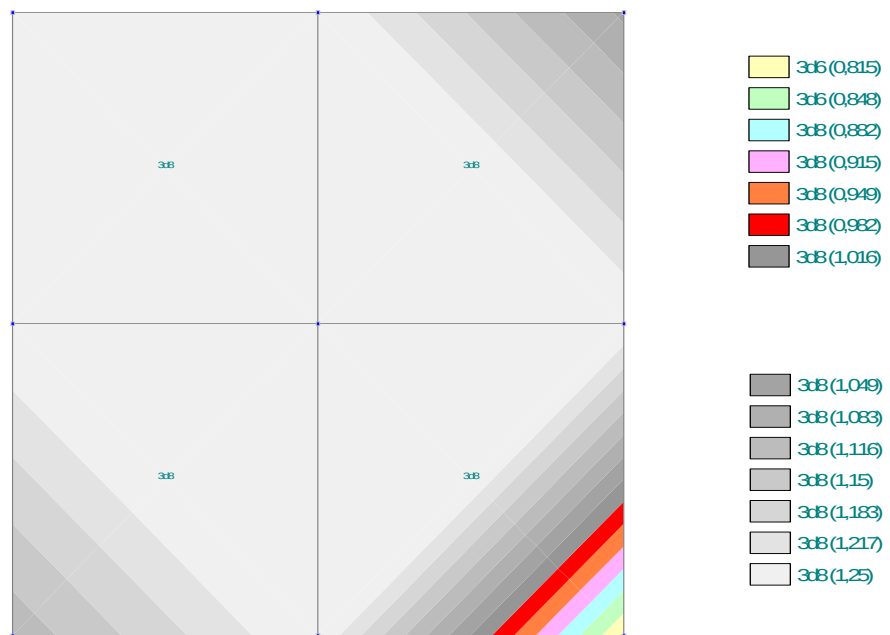


Рис. 5. Требуемая продольная рабочая горизонтальная (верхняя) арматура над проемом ПР1, диаметр в мм (см²)

Fig. 5. Required longitudinal horizontal (upper) reinforcement over opening ПП1, mm (cm²) Dia

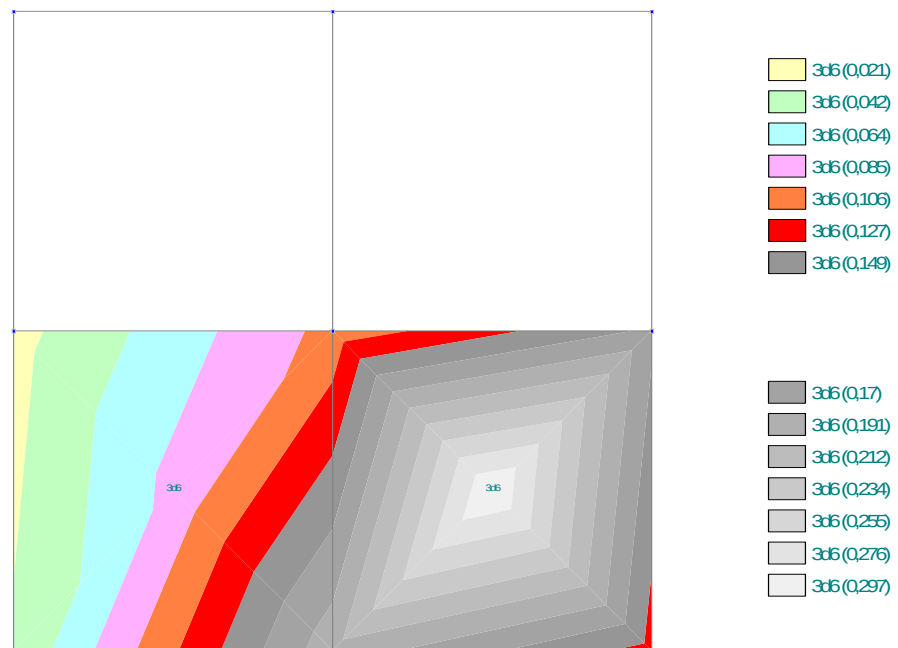


Рис. 6. Требуемая продольная рабочая горизонтальная (нижняя) арматура над проемом
ПР2, диаметр в мм (см²)

Fig. 6. Required longitudinal horizontal (lower) reinforcement over opening ПР2, mm (cm²) Dia

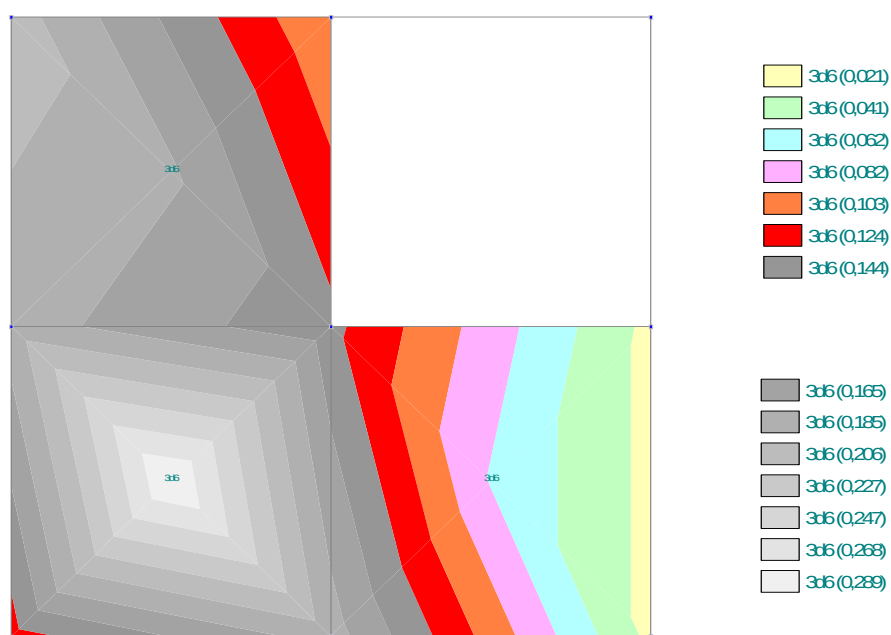


Рис. 7. Требуемая продольная рабочая горизонтальная (верхняя) арматура над проемом ПР2, диаметр в мм (см²)

Fig. 7. Required longitudinal horizontal (upper) reinforcement over opening PP2, mm (cm²) Dia

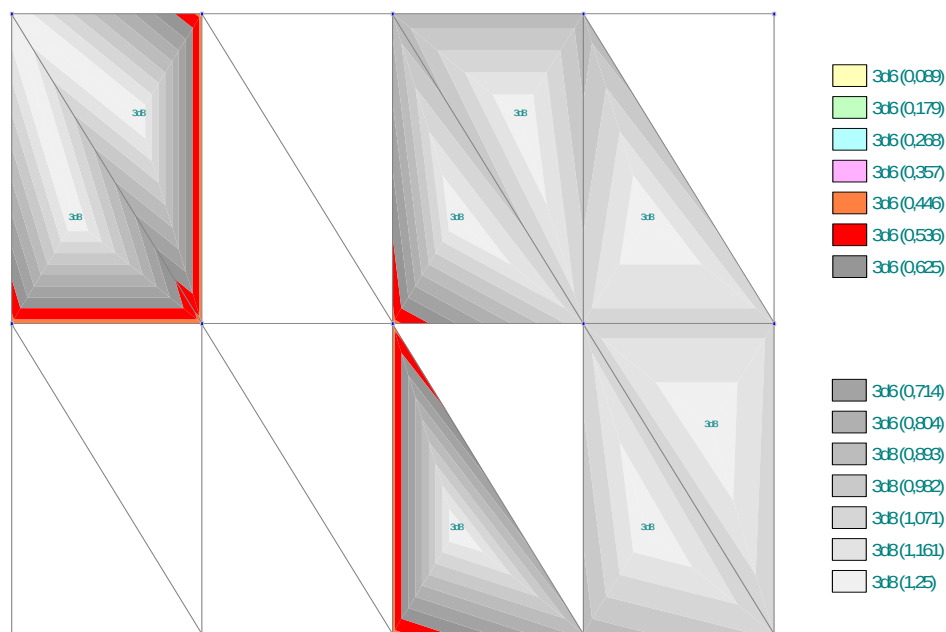


Рис. 8. Требуемая продольная рабочая горизонтальная (нижняя) арматура над проемом ПР3, диаметр в мм (см²)

Fig. 8. Required longitudinal horizontal (lower) reinforcement over opening PP3, mm (cm²) Dia

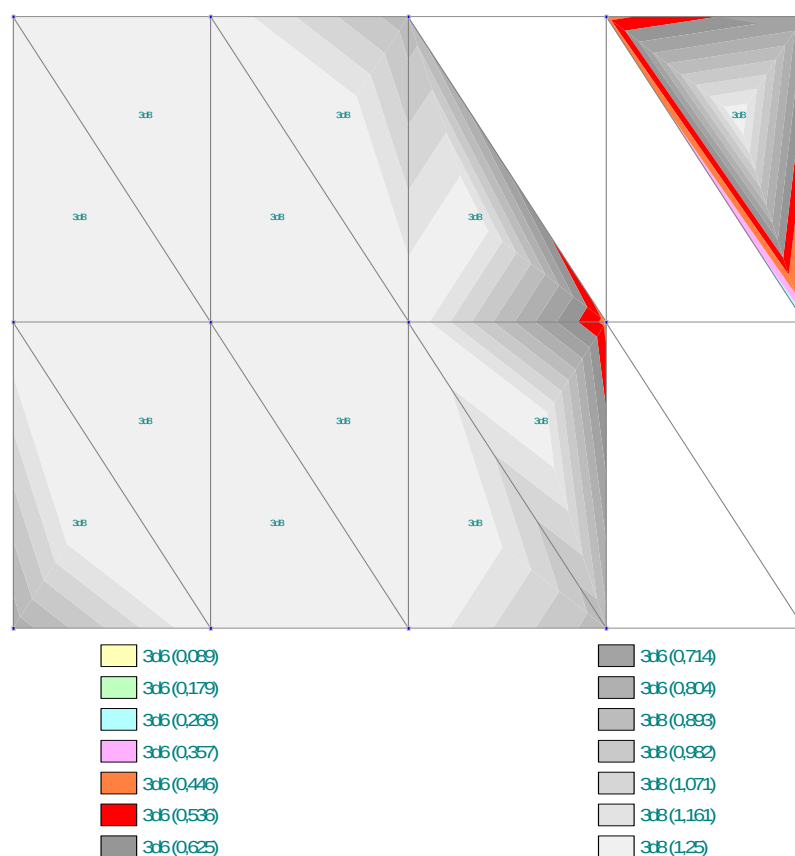


Рис. 9. Требуемая продольная рабочая горизонтальная (верхняя) арматура над проемом ПР3, диаметр в мм (см²)

Fig. 9. Required longitudinal horizontal (upper) reinforcement over opening PP3, mm (cm²) Dia

Анализ полученных диаграмм раскладки требуемой арматуры показывает, что для проемов ПР1 и ПР3 минимальное армирование составляет 3d8 класса A400, для проема ПР2 – 3d6 класса A400 как для нижней, так и для верхней (по отношению к местной оси конечного элемента z) арматуры. В конструкции железобетонной стены установлен один стержень d8 класса A400 (горизонтальная распределительная арматура в стене, установленная с шагом 300 мм), который после вырезки проема станет рабочей продольной арматурой. Таким образом, после удаления бетона из новых проемов ПР1 и ПР3 дефицит армирования составит 2d8 A400, что недопустимо без компенсирующих мероприятий. Для проема ПР2 дефицит армирования составит 0,35 см² (эквивалентно 2d6 класса A400). Для восполнения удаленной арматуры необходимо предусмотреть конструкцию усиления, согласно СП 164.1325800.2014.

Возможен вариант усиления участка стены над вырезаемым проемом с помощью наклейки двусторонней обоймы из углепластиковых армированных холстов или лент. Рекомендуется использовать карбопластиковые ленты Sika марки Sika Carbo Dur M.

Требуемое сечение углепластиковой ленты S_{cf} для одной грани предлагается определять из условия равенства несущей способности ленты и несущей недостающей рабочей арматуры, т. е. по формуле

$$S_{cf} = A_{req} \frac{R_s}{R_{cf}}, \quad (1)$$

где A_{req} – площадь недостающей стержневой арматуры, определяемая по формуле (2); R_s – прочность стержневой арматуры; R_{cf} – прочность углепластиковых холстов (лент).

$$A_{req} = n \cdot A_s, \quad (2)$$

где n – количество стержней; A_s – площадь сечения арматуры.

Для обеспечения анкеровки определяется требуемая длина заведения ленты за опорное сечение проема l_{an} по формуле

$$l_{an} = \frac{N_{\max}}{(a \cdot R_{adg})}, \quad (3)$$

где $N_{\max}$ – максимальное усилие, равное: $N_{\max} = n \cdot A_s \cdot R_s = 2 \cdot 50,3 \cdot 400 = 40240$ Н; R_{adg} – адгезия к сухому бетону (разрушение бетона), которая составляет 5 МПа³.

Определение требуемого сечения углепластиковой ленты S_{cf} для одной грани по формуле (1):

$$S_{cf} = 100,6 \frac{400}{2400} = 16,8 \text{ мм}^2,$$

где $A_{req} = n \cdot A_s = 2 \cdot 50,3 = 100,6 \text{ мм}^2$.

Согласно СП 164.1325800.2014, можно принять ленту Sika Carbo Dur M614 (из минимального номера сортамента) следующими размерами поперечного сечения: шириной $a = 60$ мм, толщиной $t = 1,4$ мм.

Тогда требуемая длина анкеровки составит

$$l_{an} = \frac{40240 \text{ Н}}{(60 \text{ мм} \cdot 5 \text{ Н/мм}^2)} = 134,1 \text{ мм}.$$

Окончательно длина анкеровки на каждую сторону ленты принимается равной $l_{an} = 140$ мм.

Схема устройства усиления участков стен над вырезаемыми проемами с использованием углепластиковых лент и разрез А-А представлены на рис. 10, 11.

³ System Sika CarboDur.doc. URL: <https://gk-innova.ru/wp-content/uploads/2017/11/Sika-CarboDur.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).

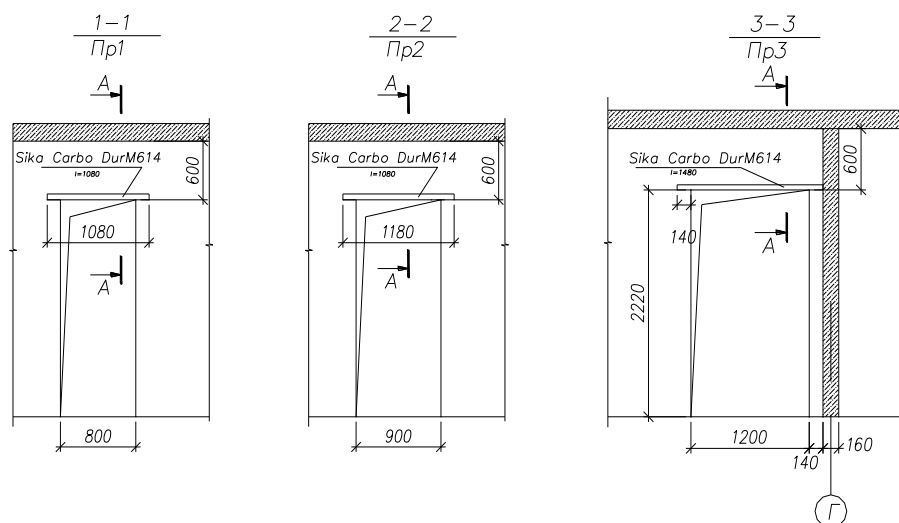


Рис. 10. Схема усиления проемов
Fig. 10. Schematic of opening reinforcement

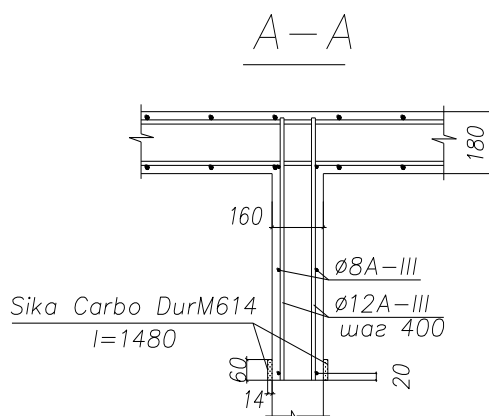


Рис. 11. Разрез А-А
Fig. 11. Cut A-A

Выводы

В качестве конструктивного решения усиления вместо традиционного стального армирования может быть принята наклейка карбопластиковых лент Sika Carbo Dur M614 по предложенной схеме.

1. При усилении углепластиковыми волокнами необходимо выполнить подготовку поверхности под оклеивание, произвести укладку усиливающего слоя согласно требованиям нормативных документов и произвести отделку участка усиления бетонным слоем.

2. Для достижения эффективной совместной работы элементов усиления, т. е. углепластиковых тканей с конструкцией, рекомендуется использовать адгезивные средства повышенной прочности, а также применять тканевые бандаж и хомуты.

3. Сравнительный анализ экономической эффективности показывает, что сметная стоимость усиления углеродной тканью составляет 765,432 тыс. руб., а с металлической арматурой – 544,702 тыс. руб. Хотя использование металла обходится немного дешевле, внешнее армирование конструкций углепластиковыми материалами обладает некоторыми преимуществами: малый вес усиливаемой конструкции, сокращение продолжительности работ по усилению, высокая стойкость к коррозии и агрессивной среде, значительная долговечность, а также сохранение первоначального архитектурного и эстетического облика конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хаяутин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2002. № 6. С. 17–20; 2003. № 1. С. 25–29.
2. Шилин А.А., Пишеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. Москва : Стройиздат, 2007. 184 с. ISBN 978-5-274-01972-9.
3. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Наукo-ведение : интернет-журнал. 2012. № 4 (13). С. 1–22. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).
4. Юшин А.В., Морозов В.И. Анализ напряженно-деформированного состояния двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению, с учетом нелинейности // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15235> (дата обращения: 20.03.2025).
5. Быков А.А., Снигирева В.Н., Корягин А.А. Экспериментальное исследование железобетонных балок, усиленных углепластиком, с учетом оштукатуривания ремонтным составом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 3 (23). С. 147–159. DOI: 10.15593/2409-5125/2016.03.10. EDN: WXIHCH
6. Смолина М.В., Прохорова А.Е. Опыт применения системы внешнего армирования железобетонных пролетных строений автодорожных мостов композитными материалами в условиях Крайнего Севера // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. № 1 (15). URL: trts.esrae.ru/28-149 (дата обращения: 20.03.2025).
7. Мугаллимова И.И. Система внешнего армирования как способ усиления монолитного безбалочного железобетонного перекрытия // Молодой ученый. 2021. № 19 (361). С. 32–35. URL: <https://moluch.ru/archive/361/80725/> (дата обращения: 20.03.2025).
8. Полимерные композитные материалы при ремонте и реконструкции. URL: https://sropk.ru/download/Building_materials/prezentetion_kompozit.pdf (дата обращения: 20.03.2025).

REFERENCES

1. Khayutin Yu.G., Chernyavsky V.L., Axelrod E.Z. Application of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Building Reinforcement. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2002; (6): 17–20. 2003; (1): 25–29. (In Russian)
2. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External Reinforcement of Steel Concrete Structures with Composite Materials. Moscow: Stroyizdat, 2007. 181 p. ISBN 978-5-274-01972-9. (In Russian)
3. Ovchinnikov I.G., Valiev S.N., Ovchinnikov I.I., Zinoviev V.S., Umirov A.D. Composites for Strengthening Reinforced Concrete: 1 Composite Strengthening for Flexural Reinforced Concrete Structures. *Naukovedenie*. 2012; 4 (13): 1–22. Available: <https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf> (accessed March 20, 2025). (In Russian)
4. Yushin A.V., Morozov V.I. Non-Linear Analysis of 2-Span Beams with Shear Strengthening with Carbon Fiber Reinforcement Polymer (CFRP). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; (5): 273. Available: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15235> (In Russian)

5. Bykov A.A., Snigireva V.N., Koryagin A.A. RC Beams Strengthened with CFRP Sheet with Repair Mortar Recasting. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ehkologiya. Urbanistika*. 2016; 3 (23): 147–159. DOI 10.15593/2409-5125/2016.03.10. EDN: WXIHCH (In Russian)
6. Smolina M.V., Prokhorova A.E. Strengthening of Concrete Structures of Highway Bridge Spans with Composite Materials in Extreme North Conditions. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2016; 1 (15). Available: trts.esrae.ru/ru/28-149 (accessed March 20, 2025). (In Russian)
7. Mugallimova I.I. External Reinforcement System as a Method of Strengthening a Monolithic Beam-Free Reinforced Concrete Floor. *Molodoi uchenyi*. 2021; 19 (361): 32–35. Available: <https://moluch.ru/archive/361/80725/> (accessed March 20, 2025). (In Russian)
8. Polymer composite materials in repair and reconstruction: Available: https://sropk.ru/download/Building_materials/prezentetion_kompozit.pdf (accessed March 20, 2025).

Сведения об авторах

Опбул Эрес Кечил-оолович, канд. техн. наук, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9; Тувинский государственный университет, 667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, fducnufce@mail.ru

Ширунов Гурий Николаевич, докт. техн. наук, Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22, guriyn@mail.ru

Калдар-оол Анай-Хаак Бугалдаевна, канд. техн. наук, Тувинский государственный университет, 667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, oorzhaka-h@mail.ru

Намчыл Евгений Эдуардович, аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9.

Authors Details

Ehres K. Opbul, PhD, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia; Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Russia, fducnufce@mail.ru

Gurii N. Shirunov, DSc, The Saint Petersburg Military Engineering-Technical University (Nikolaevsky), 8, Makarov Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russia, guriyn@mail.ru

Anai-Khaak B. Kaldar-ool, PhD, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Russia, oorzhaka-h@mail.ru

Evgenii E. Namchil, Research Assistant, The Saint Petersburg Military Engineering-Technical University (Nikolaevsky), 8, Makarov Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russia.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 109–119.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 109–119.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-109-119

EDN: INTTVI

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОЛОНН И СВЯЗЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗДАНИЯ ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

Иван Иванович Подшивалов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Объектом исследования является экспериментальный пятиэтажный сборно-монолитный безригельный каркас здания с подвалом системы КУБ 2.5 с уровнем ответственности КС-2.

Целью работы являлась расчетная оценка возможности прогрессирующего обрушения каркаса здания при выключении средней колонны в подвале с помощью трех методов – квазистатического и динамического, а также кинематического метода предельного равновесия.

Моделирование напряженно-деформированного состояния сборно-монолитного железобетонного каркаса выполнено в ПК Ing+ MicroFe с разработкой пространственной конечно-элементной модели.

Полученные результаты показали невозможность прогрессирующего обрушения каркаса при удалении средней колонны в подвале экспериментального здания.

При сравнении результатов расчета каркаса от прогрессирующего обрушения тремя методами получена сходимость результатов по предельной нагрузке в колоннах и связях в пределах 15 %. Динамический метод расчета показал более высокие значения предельной нагрузки по сравнению с квазистатическим и кинематическим методом предельного равновесия.

Ключевые слова: сборно-монолитный каркас, прогрессирующее обрушение, выключение колонны, расчетная модель, напряженное состояние

Для цитирования: Подшивалов И.И. Моделирование напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения расчетными методами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 109–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-109-119. EDN: INTTVI

ORIGINAL ARTICLE

COMPUTATIONAL MODELING OF PROGRESSIVE COLLAPSE-INDUCED STRESS-STRAIN STATE OF COLUMNS AND ASSEMBLIES IN EXPERIMENTAL BUILDING**Ivan I. Podshivalov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. Purpose: The aim of this work is to evaluate the probability of progressive collapse due to the removed column in a basement of the experimental building using three computational methods – quasi-static, dynamic and kinematic methods of the limit equilibrium.

Methodology/approach: The stress-strain state of the semi prefabricated building system is performed by the finite element method using the verified software package Ing+ MicroFe.

Research findings: It is shown that no progressive collapse can occur with the removed column in a basement of the experimental building. A 15 % precision is obtained in comparing calculation results of the progressive collapse by three methods of the limit equilibrium. The dynamic approach provides larger values of the ultimate load than the quasi-static and kinematic approaches.

Keywords: semi prefabricated building system, progressive collapse, removed column, computational model, stress-strain state

For citation: Podshivalov I.I. Computational Modeling of Progressive Collapse-Induced Stress-Strain State of Columns and Assemblies in Experimental Building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 109–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-109-119. EDN: IHTTVI

Сборно-монолитное исполнение каркаса позволяет максимально эффективно использовать преимущества монолитного и сборного домостроения [1]. Одним из главных достоинств монолитных конструкций является возможность строительства зданий практически любой формы. В свою очередь, основным преимуществом сборных конструкций выступает возможность устройства стен и перекрытий заводского изготовления. В сборно-монолитном домостроении наблюдается, с одной стороны, завышенная оценка эффективности конструктивных решений [2], а с другой – существует недостаточная экспериментальная база данных для объективного анализа несущей способности, жесткости и трещиностойкости конструкций [3].

Применение монолитного ребристого перекрытия по сравнению с плоским позволяет получить конструкцию с более высокой несущей способностью, жесткостью и трещиностойкостью, а также приводит к уменьшению расхода бетона и арматуры [4]. Однако в жилых зданиях, из-за малой высоты помещений, устройство ригелей нежелательно [5].

В исследовании [6] предложен сборно-монолитный каркас здания повышенной этажности, в котором пространственная устойчивость обеспечивается арматурным соединением и замоноличиванием сборных панелей-рам, монолитных участков ригелей и дисков сборных плит перекрытий. Для защиты от прогрессирующего обрушения предусмотрено расчленение каркаса на отдельные фрагменты с шарнирным соединением между собой.

Живучесть, по определению проф. В.Д. Райзера [7], – это свойство конструкций сохранять при аварийных воздействиях способность к выполнению основных функций, не допуская лавинообразного (каскадного) разрушения. Здание следует проектировать таким образом, чтобы в случае разрушения какого-либо элемента весь объект или его наиболее ответственная часть сохраняли работоспособность в течение времени, достаточного для принятия срочных мер [8].

В настоящее время для повышения безопасности зданий и сооружений, и тем самым сохранения жизни людей, стало необходимым учитывать запроектные нагрузки [9, 10, 11, 12]. Расширился перечень зданий, подлежащих расчету от прогрессирующего обрушения¹ до уровня ответственности КС-2. Устойчивость от прогрессирующего обрушения проверяется расчетом на особое сочетание нагрузок, включающее постоянные и временные длительные нагрузки [13]. В случае локального разрушения отдельных элементов, конструктивная система должна обладать способностью перераспределять усилия между сохранившимися конструкциями. Расчет от прогрессирующего обрушения выполняется при использовании пространственных расчетных моделей [14]. За расчетные характеристики материалов принимаются их нормативные значения. Устойчивость здания к прогрессирующему обрушению обеспечивается рассмотрением различных сценариев исключения несущих элементов. При необходимости проектируются дополнительные связевые элементы или повышается локальная несущая способность элементов конструкции.

Учет динамического эффекта при удалении колонны на заданный временной интервал может быть выполнен пошаговым способом путем увеличения силы P_z в узле конечно-элементной модели до значения, равного усилию в удаленной колонне при статическом нагружении [15]. Затем происходит мгновенное снятие этой силы, что вызывает появление собственных колебаний и динамический эффект [16].

Параметры прогрессирующего обрушения определяются путем учета нагрузки от выключенного из работы конструктивного элемента, реакция от которого может приниматься следующим образом: мгновенное удаление выключаемого конструктивного элемента в первичной расчетной схеме (ПРС) моделируется внутренними усилиями, прикладываемыми во вторичной расчетной схеме (ВРС) с обратным знаком – коэффициент моделирования усилий $K = 1$, что соответствует максимально невыгодному условию при динамическом коэффициенте $K_d = 2$ (например, продольная сила, возникающая в выключенной колонне, прикладывается в верхний узел и направлена сверху вниз). По этим параметрам выполняется расчет от прогрессирующего обрушения квазистатическим методом.

Как известно, в теории предельного равновесия отдельный элемент в конструкции не может разрушиться, может разрушиться вся конструкция. При расчете кинематическим методом теории предельного равновесия в ВРС рассматривается состояние конструктивной системы в момент удаления колонны, когда реакция (продольная сила и два изгибающих момента) прикладывается с противоположным знаком. При расчете стержневых элементов вво-

¹ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения.

дятся две опции – задание многомерных элементных шарниров и определение несущей способности конструктивных элементов по предельным поверхностям. Далее выполняется расчет по типу квазистатического.

При динамическом расчете в ВРС выключается какой-либо конструктивный элемент, реакция от выключенного элемента принимается с измененным знаком с коэффициентом моделирования усилий $K = 1$. Нагружение расчетной модели производится в три этапа².

1. Перед выключением из работы конструктивного элемента, для получения корректного квазистатического напряженно-деформированного состояния конструкции, приложение нагрузки от выключенной из работы колонны производится линейно от 0 до 100 % на протяжении 15 с (примерно два периода собственных колебаний).

2. Выключение конструктивного элемента из работы происходит за 0,01 с при основном периоде собственных колебаний колонны 0,1 с.

3. Расчет с удаленным конструктивным элементом в динамической постановке выполняется в течение следующих 25 с (общий интервал времени 40 с).

Результатом динамического расчета является определение максимумов динамического воздействия во временной области от выключенного из работы элемента, по типу воздействия являющегося особым, на которое выполняется конструктивный расчет элементов каркаса.

Рассматриваемое экспериментальное пятиэтажное двухподъездное здание с подвалом прямоугольной формы в плане имеет размеры по осям 43,34×12 м, запроектировано для строительства в Кемеровской области. Высота здания составляет 18,65 м. По уровню ответственности здание относится к классу КС-2 как экспериментальное, подлежит расчету от прогрессирующего обрушения.

Конструктивная схема здания представляет собой сборно-монолитный безригельный каркас, который состоит из сборных железобетонных колонн сечением 400×400 мм и жестких дисков перекрытий толщиной 160 мм. Объединение колонн в единую пространственную систему выполняется за счет жесткого соединения сборных панелей перекрытий с колоннами через сварку закладных деталей. Дополнительная жесткость обеспечивается за счет соединения сборных панелей перекрытий петлевыми арматурными выпусками по периметру панелей с последующим замоноличиванием всех стыковых соединений.

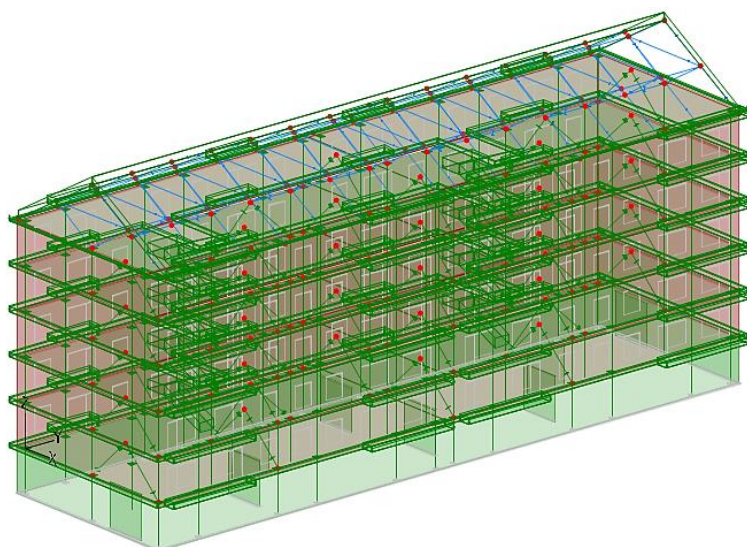
По заданной конструктивной схеме здания была разработана расчетная модель в программном комплексе Ing+2021 MicroFe. Плоскостные элементы моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», колонны и связи – конечным элементом типа «стержень». Расчетная модель здания приведена на рис. 1.

Расчет каркаса здания от прогрессирующего обрушения в ВРС выполнялся тремя методами:

- квазистатическим методом;
- кинематическим методом теории предельного равновесия;
- динамическим методом.

² Методическое пособие. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Москва, 2018. С. 156.

a



б

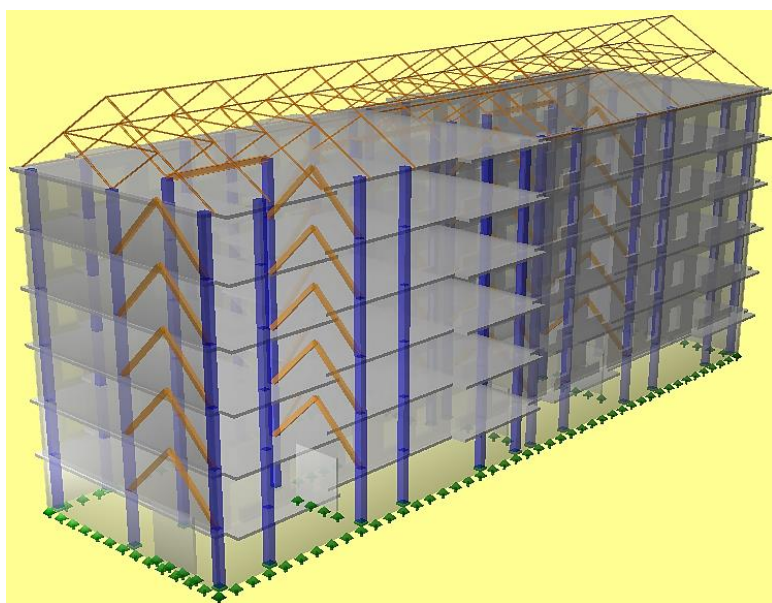


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б)

Fig. 1. Computational FEM (a) and visualization (b)

При расчете от прогрессирующего обрушения квазистатическим методом при выключении средней колонны в подвале были получены изополя продольных усилий и предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса (рис. 2). Анализ данных показывает, что наибольшие продольные усилия возникли в оставшихся средних колоннах подвала, достигнув значения $N_{\max} = -1403,6$ кН. При заданном армировании максимальное значение коэффициента использования предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса составило $K_{\text{испmax}} = 0,694 < 1$, что обозначает отсутствие пластических шарниров в рассматриваемых элементах.

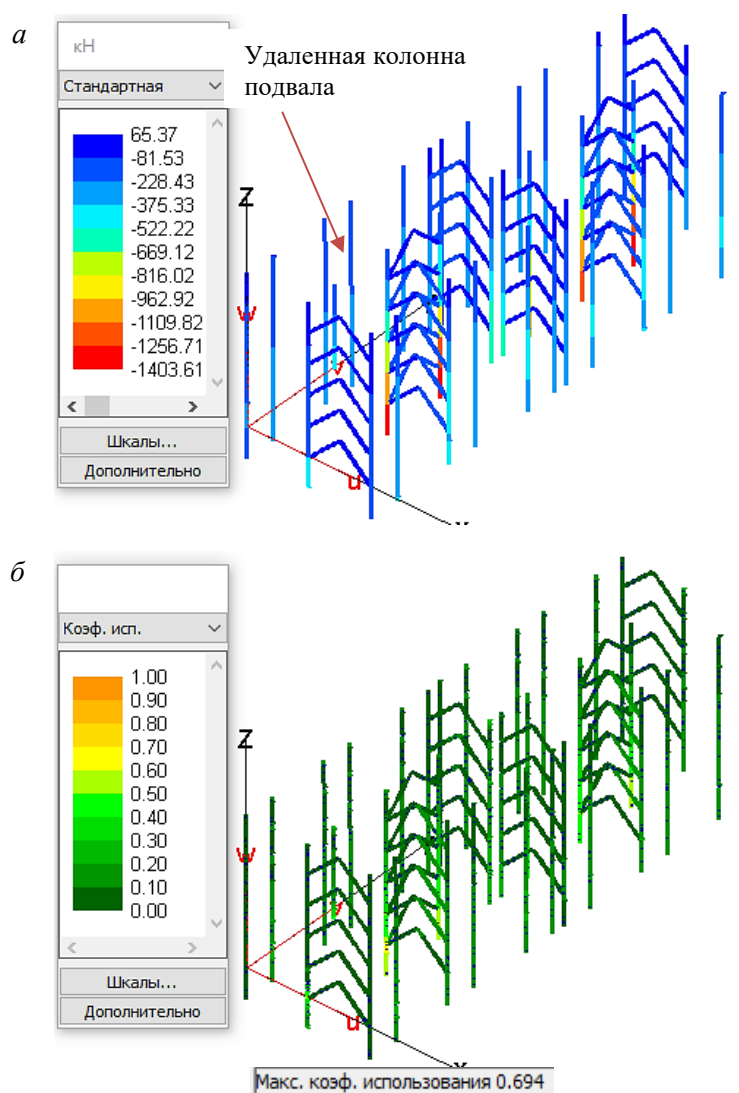


Рис. 2. Изополя продольных усилий (а) и предельной нагрузки (б) в колоннах и связях при расчете квазистатическим методом

Fig. 2. Isofields of longitudinal forces (a) and ultimate load (b) in columns and assemblies calculated by quasi-static method

Расчет от прогрессирующего обрушения выполнен кинематическим методом теории предельного равновесия при выключении средней колонны в подвале. Изополя продольных усилий и предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса приведены на рис. 3. Как видно из результатов, наибольшие продольные усилия, аналогично предыдущему случаю, возникли в оставшихся средних колоннах подвала и составили $N_{\max} = -1432,7$ кН. Максимальное значение коэффициента использования предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса равно $K_{\text{исп}\max} = 0,739 < 1$, что также указывает на отсутствие пластических шарниров в элементах конструкции.

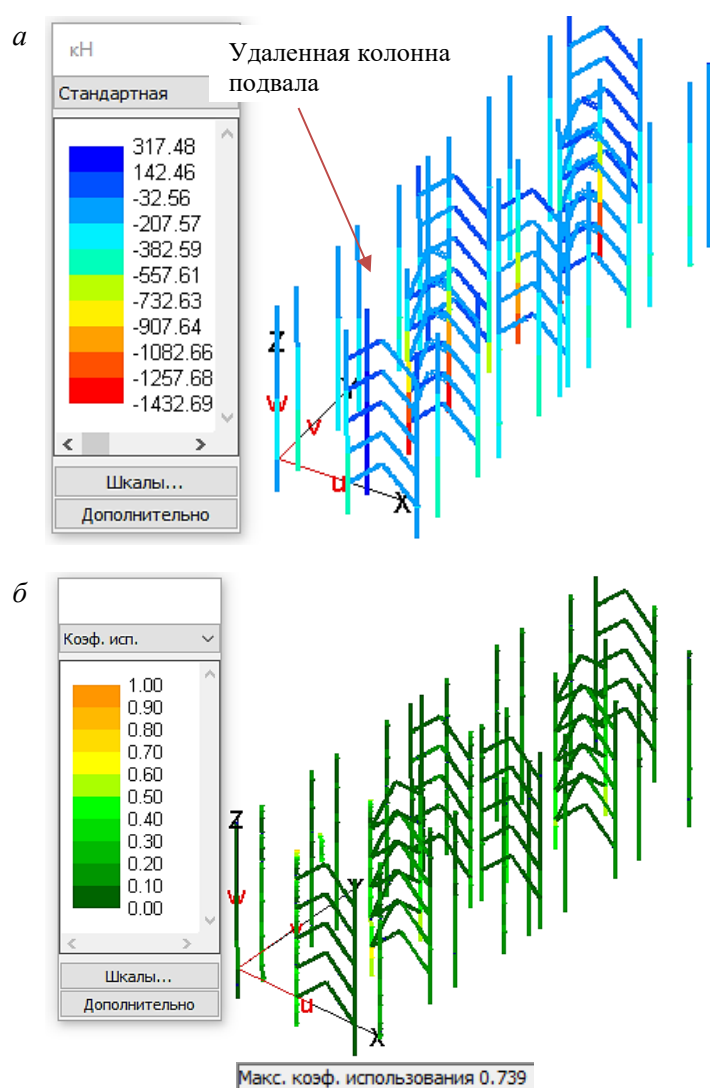


Рис. 3. Изополя продольных усилий (а) и предельной нагрузки (б) в колоннах и связях при расчете кинематическим методом теории предельного равновесия

Fig. 3. Isofields of longitudinal forces (a) and ultimate load (b) in columns and assemblies calculated by kinematic method

При расчете от прогрессирующего обрушения динамическим методом при выключении средней колонны в подвале были получены изополя продольных усилий и предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса (рис. 4). Рисунок демонстрирует, что наибольшие продольные усилия в оставшихся средних колоннах подвала увеличились, по сравнению с предыдущими случаями, и составили $N_{\max} = -1901,2$ кН. Максимальное значение коэффициента использования предельной нагрузки в колоннах и связях каркаса также возросло и достигло $K_{\text{исп max}} = 0,739 < 1$, что означает отсутствие пластических шарниров в этих элементах.

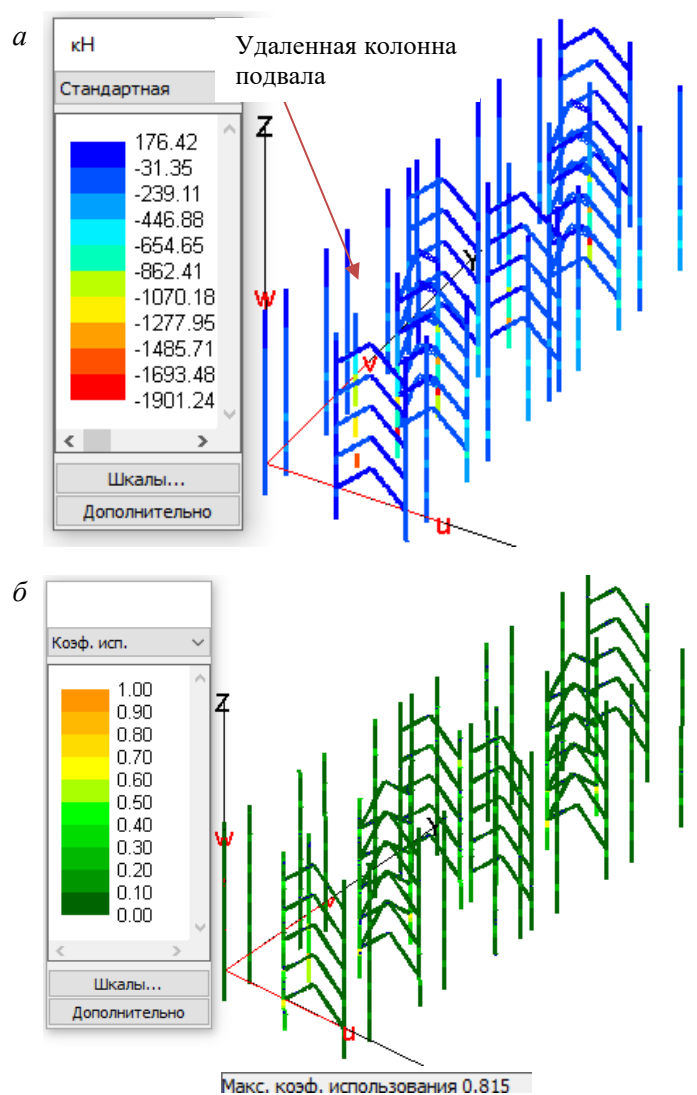


Рис. 4. Изополя продольных усилий (а) и предельной нагрузки (б) в колоннах и связях при расчете динамическим методом

Fig. 4. Isofields of longitudinal forces (a) and ultimate load (b) in columns and assemblies calculated by dynamic method

В качестве пояснений к динамическому расчету (рис. 5) показано задание коэффициентов динамических параметров от статической нагрузки и от реакции удаленной колонны в подвале. Коэффициент $K = 1$ обозначает принятие полной величины нагрузки. График изменения динамической реакции от удаленной колонны подвала приведен на рис. 6. Из данных графика следует, что наибольшее значение продольного усилия в колонне первого этажа, вызванного удалением колонны подвала, составляет $\text{Min} = -1640$ кН, что хорошо коррелируется со значениями продольного усилия в колонне первого этажа над удаленной колонной подвала (см. рис. 4, а).

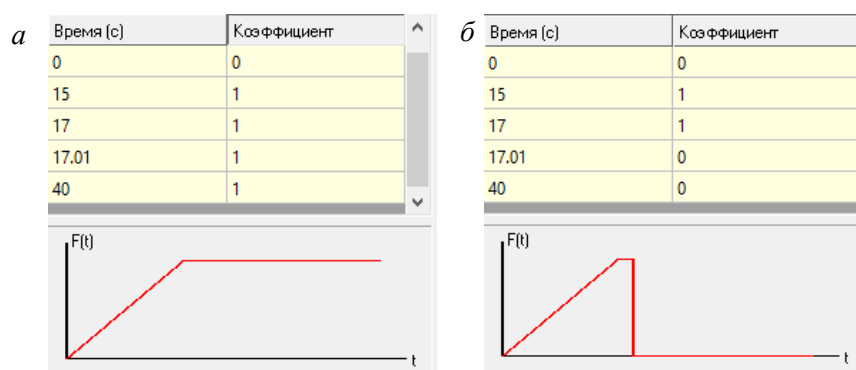


Рис. 5. Задание коэффициентов динамических параметров:

a – от статической нагрузки; *б* – от реакции удаленной колонны в подвале

Fig. 5. Stipulation of dynamic parameter coefficients: *a* – from static load; *b* – from removed column response

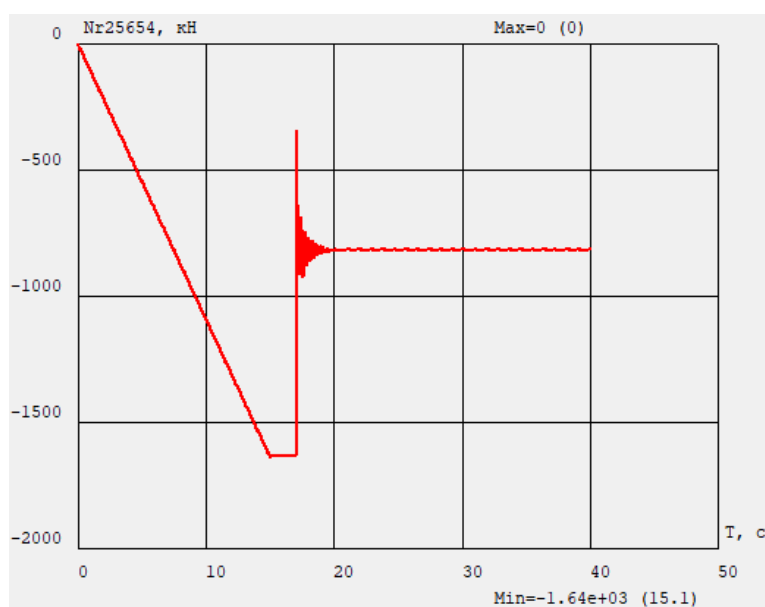


Рис. 6. Динамическая реакция от удаленной колонны в подвале

Fig. 6. Dynamic response from the removed column in the basement

Выводы

Полученные результаты показали невозможность прогрессирующего обрушения каркаса при удалении средней колонны в подвале экспериментального здания.

В заключение можно отметить, что при сравнении результатов расчета от прогрессирующего обрушения, выполненных квазистатическим методом, кинематическим методом теории предельного равновесия и динамическим методом, была получена сходимость результатов по предельной нагрузке в колон-

нах и связях в пределах 15 %. При этом квазистатический и кинематический методы дают нижнее значение по предельной нагрузке в колоннах и связях каркаса, а динамический метод демонстрирует верхнее значение.

Таким образом, неиспользование динамического метода расчета может привести к результату с заниженными значениями предельной нагрузки в колоннах и связях сборно-монолитного железобетонного каркаса экспериментального здания системы КУБ 2.5.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Унифицированная система* сборно-монолитного каркаса КУБ 2.5. Выпуск 1-1. Москва : Стройиздат, 1990. 49 с.
2. Митасов В.М., Коянкин А.А. Работа диска сборно-монолитного перекрытия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 3. С. 103–104.
3. Коянкин А.А., Митасов В.М. Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестник МГСУ. 2015. № 9. С. 28–35.
4. Маковский С.А., Новиков М.В., Маковская Т.А. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния монолитного перекрестно-ребристого перекрытия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 91–96. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-91-96. EDN: YTPQIJ
5. Яров В.А., Скрипальчиков К.В. Безригельные монолитные перекрытия многоэтажных зданий с колоннами крестового сечения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2. С. 97–91.
6. Ключева Н.В., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А., Бухтиярова А.С. Прочность и деформативность сборно-монолитных каркасов жилых зданий пониженной материалоемкости при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 5–9.
7. Райзер В.Д. К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77–78.
8. Краснощекоев Ю.В., Мельникова С.О., Екимов А.А. Живучесть многоэтажного здания со связевым каркасом // Вестник СибАДИ. 2016. Вып. 2 (48). С. 100–104.
9. Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN: YXLQNV
10. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95–101.
11. Алмазов В.О., Кхой Као Зуй. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. Москва : Изд-во АСВ, 2013. 128 с.
12. Ведяков И.И., Ефремов П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. EDN: ZIJLAD
13. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 9–13.
14. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5. С. 15–26. DOI: 10.5862/MCE.49.2. EDN: SKNSAV
15. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Цуриков С.Г., Лукьянов В.И. Расчет железобетонного каркаса здания с учетом аварийного воздействия во временной области // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2.
16. Подшивалов И.И. Анализ результатов моделирования напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 180–190. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190. EDN: JQGGQE

REFERENCES

1. Unified Reinforced Concrete Composite Frame KUB 2.5. Issue 1-1. Moscow: Stroizdat, 1990. 49 p. (In Russian)
2. Mitasov V.M., Koyankin A.A. Disc Operation of Reinforced Concrete Composite Slab. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2014; (3): 103–104. (In Russian)
3. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Prefabricated Solid Building Frame and its Properties in Different Life Cycles. *Vestnik MGSU*. 2015; (9): 28–35. (In Russian)
4. Makovskii S.A., Novikov M.V., Makovskaya T.A. Finite Element Analysis of the Stress-Strain State of Cast-in-Place Beam-and-Slab Floor. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*. 2017; (2): 91–96. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-91-96 (In Russian)
5. Yarov V.A., Skripal'shchikov K.V. Reinforced Concrete Composite Frame without Collar Beams with X Cross-Section. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; (2): 97–91. (In Russian)
6. Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Rypakov D.A., Bukhtiyarova A.S. Strength and Deformability of Prefabricated Monolithic Frames of Residential Buildings of Reduced Material Intensity under Off-Design Impacts. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (1): 5–9. (In Russian)
7. Raizer V.D. Toward the Building Robustness. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2012; (5): 77–78. (In Russian)
8. Krasnoshchekov Yu.V., Mel'nikova S.O., Ekimov A.A. Survivability of Multi-Floor Building with Braced Framing. *Vestnik SibADI*. 2016; 48 (2):100–104. (In Russian)
9. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'ev E.V. Building Protection Against Progressive Collapse in Terms of Legal and Regulatory Documents. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; (2): 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02 (In Russian)
10. Kodysh E.N. Design Protection of Buildings Against Progressive Collapse, with Respect to Limit State. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (1): 95–101. (In Russian)
11. Almazov V.O., Kkhoi Kao Zui. Dynamics of Progressive Collapse of Reinforced Concrete Composite Frames of Multi-Floor Buildings. Moscow: ASV. 128 p. (In Russian)
12. Vedyakov I.I., Efremov P.G., Odesskii P.D., Popov N.A., Solov'ev D.V. Progressive Collapse Analysis of Buildings: Normative Requirements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; (4): 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04 (In Russian)
13. Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. Protection of Multi-Floor Buildings Against Progressive Collapse. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016; (6): 9–13. (In Russian)
14. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Consideration of Changes in Design Diagram in Structural Analysis. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014; (5): 15–26. DOI: 10.5862/MCE.49.2 (In Russian)
15. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Tsurikov S.G., Luk'yanov V.I. Strength Analysis of Reinforced Concrete Frame of the Building, with Respect to Possible Collapse Impact. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015; (2): 15. (In Russian)
16. Podshivalov I.I. Progressive Collapse Analysis of Experimental Building Skeleton Based on Stress-Strain State of Columns and Joints. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (3): 180–190. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190. EDN: JQGQZE (In Russian)

Сведения об авторе

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodshivalov@list.ru

Author Details

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodchivalov@list.ru

Статья поступила в редакцию 03.12.2024
Одобрена после рецензирования 16.01.2025
Принята к публикации 21.04.2025

Submitted for publication 03.12.2024
Approved after review 16.01.2025
Accepted for publication 21.04.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 120–132.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 120–132.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.004.94

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-120-132

EDN: TZSOEC

ТЕХНОЛОГИИ BIM ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ В МЬЯНМЕ

Вин Ко Мьинт Ту, Хан Вей Тун, Аркар Уе Хтет, Ян Лин Аунг

Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Информационное моделирование зданий (BIM) в настоящее время является концепцией, которая развивается самыми быстрыми темпами в строительной отрасли во всем мире, и в том числе в Мьянме. Технологии BIM повышают производительность процессов, эффективность совместной работы и функциональность, что улучшает планирование и управление проектами и постепенно становится нормой для строительных проектов во многих странах. В последние годы Мьянма начала внедрять BIM-технологии в качестве альтернативы традиционным методам проектирования и строительства. Однако применение BIM в Мьянме все еще исследуется и сталкивается с рядом сложностей, включая недостаток опыта у участников и осторожное отношение к нововведениям. Особую актуальность внедрение BIM приобретает в контексте государственных инициатив по развитию инфраструктуры. Чтобы удовлетворить потребности растущего населения, правительство Мьянмы планирует построить миллион жилых домов в рамках программы «Умный город» к 2030 г. с применением BIM.

Целью настоящей работы является анализ текущего состояния и перспектив применения технологии BIM в строительной отрасли Мьянмы. Рассматриваются современные тенденции внедрения BIM в строительной отрасли, выявляются основные проблемы и предлагаются рекомендации для дальнейшего развития BIM в стране. Авторы разработали предварительный проект инфраструктурного объекта с использованием инструментов BIM-моделирования для бесшовной интеграции проектирования, оптимизации рабочих процессов и проведения точного структурного анализа.

Результаты исследования подтверждают эффективность BIM в оптимизации процессов проектирования, повышении точности проектных решений, минимизации ошибок проектирования, обеспечении соответствия стандартам безопасности и повышении общей точности проекта.

Ключевые слова: Мьянма, BIM, строительный сектор, инфраструктура, информационные технологии, внедрение BIM

Для цитирования: Вин Ко Мьинт Ту, Хан Вей Тун, Аркар Уе Хтет, Ян Лин Аунг. Технологии BIM для инфраструктуры в Мьянме // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 120–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-120-132. EDN: TZSOEC

ORIGINAL ARTICLE

BIM TECHNOLOGY FOR INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT IN MYANMAR**Win Ko Myint Thu, Han Wai Htun, Arkar Ye Htet, Yan Lin Aung***Russian University of Transport, Moscow, Russia*

Abstract. In the construction industry, building information modeling (BIM) is now the concept developing the fastest both globally and in Myanmar. By increasing the process productivity, efficiency, collaboration, and functionality, BIM enhances project planning and management, and it is progressively taking over as the norm for building projects in many nations. In recent years, Myanmar has begun to adopt the BIM technology. As an alternative to traditional building design and construction, this technology is still being investigated and considered in Myanmar. The BIM technology implementation as a requirement in public works contracts, raises significant issues and challenges. To accommodate the expanding population, the Myanmar government plans to build one million residences through smart city initiatives by 2030, and it intends to use BIM for this purpose. Nonetheless, there are a lot of misconceptions about this technology in Myanmar's construction industry, as some participants in the process lack experience, and its application is extremely cautious.

Purpose: Examining the present and prospective applications of the BIM technology in Myanmar's construction industry. The current condition and developments of BIM implementation in Myanmar's construction industry are briefly reviewed.

Research findings: The developed is the preliminary design of the infrastructure project utilizing BIM modeling tools for seamless design integration, efficient workflow, and precise structural analysis. The results underscore the BIM effectiveness in optimizing design processes while ensuring compliance with safety standards, and BIM's ability to integrate multidisciplinary tasks minimized design errors and improved overall project accuracy.

Practical implications: Recommendations are provided for the future prospects of the BIM implementation in Myanmar.

Keywords: Myanmar, BIM, construction sector, infrastructure, information technology, BIM adoption

For citation: Win Ko Myint Thu, Han Wai Htun, Arkar Ye Htet, Yan Lin Aung. BIM Technology for Infrastructure Development in Myanmar. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 120–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-120-132. EDN: TZSOEC

Введение

Мьянма, также известная как Бирма, является крупнейшей по площади страной в континентальной части Юго-Восточной Азии, занимающей территорию 676 578 кв. км, с населением около 55 млн чел. [1]. Строительная отрасль Мьянмы вносит существенный вклад в экономическое развитие страны. В 2010-х гг. строительная отрасль пережила значительный рост в результате увеличения иностранных инвестиций. Однако к 2023 г. отрасль столкнулась с рядом проблем, которые ограничивают ее развитие. Движущей силой строительной индустрии Мьянмы остаются государственные жилищные программы и частное коммерческое жилое строительство, включая индивидуальные дома, квартиры и элитные кондоминиумы. Несмотря на это, значительная часть дея-

тельности сосредоточена на жилом секторе. Строительный сектор также играет центральную роль в развитии инфраструктуры, охватывающей транспортные сети (дороги, мосты и аэропорты), коммунальные услуги (водоснабжение и электроснабжение) и общественные объекты (школы и больницы). Для улучшения городской инфраструктуры правительство приступило к реализации ряда проектов, хотя результаты остаются неоднозначными. Сельские районы продолжают испытывать дефицит качественной инфраструктуры, что препятствует их развитию и снижает общий уровень жизни населения.

Спрос на новые инфраструктурные проекты в Мьянме уже высок и будет только возрастать в соответствии с экономическим ростом. Мьянме необходимо срочно ликвидировать дефицит инфраструктуры для дальнейшей интеграции в мировую экономику и сотрудничества с соседними странами. В этой связи правительство активизирует сотрудничество с частными строительными компаниями для реализации инфраструктурных проектов в области автомобильных дорог, мостов, железных дорог, портов, аэропортов, энергетики, промышленных парков и экономических зон. На рис. 1 представлен анализ строительного рынка по секторам за 2023 г.



Рис. 1. Анализ строительного рынка Мьянмы по секторам, 2023 г. (%)

Fig. 1. Myanmar construction market analysis by sectors, 2023 (%)

Глобальное внедрение BIM в строительной отрасли

В настоящее время информационное моделирование зданий широко внедряется во многих странах благодаря его преимуществам и широте использования. В строительной отрасли технологии BIM стали инструментом, трансформирующим методы планирования, координации и реализации проектов [2]. Создание цифровых моделей, описывающих функциональные и физические характеристики объекта, позволяет участникам проекта эффективно взаимодействовать на протяжении всего жизненного цикла объекта. Понимание глобальных трендов внедрения BIM, преимуществ и вызовов становится важным для профессионалов отрасли, особенно в условиях цифровизации строительства [3]. На ранней стадии процесса проектирования с использованием технологии BIM может быть разработана система поддержки принятия решений. Эта

система включает в себя выбор строительных материалов, методов возведения, пространственного расположения и систем обслуживания зданий [4]. Энергетический анализ, отслеживание выбросов, анализ вентиляции и поддержка оценки экологичности зданий – лишь некоторые из возможностей BIM, которые реализуются на протяжении всего срока службы проекта, включая процессы проектирования, строительства, эксплуатации и модернизации [5]. BIM также способствует внедрению экологически чистых и устойчивых методов строительства [6].

На этапе проектирования при традиционном подходе передача информации на бумажных носителях часто представляет собой серьезную проблему, поскольку для получения необходимых оценочных данных для проекта требуется значительное количество временных и финансовых затрат. Эти данные включают в себя оценку затрат, анализ энергопотребления, конструктивные детали и другую важную информацию. BIM позволяет использовать существующие наборы строительных данных для улучшения конфигурации зданий и повышения их эксплуатационных характеристик [7]. Программные средства, в частности Autodesk Revit, Navisworks и Tekla Structures, улучшают сотрудничество между участниками проекта, что позволяет создавать более устойчивые и конструктивно надежные проекты [8].

В архитектурном, инженерном, строительном и эксплуатационном секторе (AECO) BIM служит символом инноваций [9]. Автоматическое обновление документации при внесении изменений в BIM-модель обеспечивает точное трехмерное представление всей структуры и ее составляющих [10]. Цифровизация процессов проектирования, разработки, управления и эксплуатации проектов повышает эффективность работы [11]. Интеграция данных в BIM превосходит возможности традиционных САПР за счет улучшения совместной работы, 3D-визуализации и точных обновлений в режиме реального времени. Это также упрощает оценку устойчивости, а за счет интеграции данных непосредственно в процесс моделирования способствует более эффективному принятию решений и улучшает общие результаты проекта. Добавление компонентов 4D (время) и 5D (стоимость) выходит за рамки обычного 3D-моделирования и становится значимым фактором управления жизненным циклом инфраструктурных проектов [12]. На рис. 2 показана концепция BIM в строительном секторе. Еще одним преимуществом BIM, по сравнению с традиционными CAD-системами, является возможность легко и быстро проверить геометрию и данные моделей, что способствует обнаружению коллизий на ранних этапах проектирования. Это помогает избежать ошибок, которые могут возникнуть на этапе предварительного выполнения проекта.

С тех пор как применение технологии BIM стало обязательным требованием в строительстве, его использование расширилось [13]. Поскольку страны стремятся улучшить общественную инфраструктуру и снизить затраты с течением времени, внедрение технологии BIM стало важнейшим фактором инноваций в строительном секторе. Во всем мире несколько стран выделяются в качестве лидеров по внедрению BIM, особенно в государственном секторе. Такие страны, как Великобритания, Швеция, Финляндия, Сингапур, Канада, Южная Корея, Япония и Соединенные Штаты, внедрили прогрессивные стратегии, которые

не только предусматривают использование BIM в государственных проектах, но и интегрировали BIM в государственную политику, финансирование и учебные инициативы. С 2014 г. Китай считается лидером в использовании BIM, особенно среди крупных компаний строительного сектора. Внедрение BIM стало стандартной практикой во многих развитых и развивающихся странах, при этом количество проектов, в которых используются методологии BIM, неуклонно растет (рис. 3). Другие страны, также демонстрирующие многообещающие тенденции в области внедрения BIM, включают Польшу, Россию, Норвегию и Канаду.



Рис. 2. Внедрение концепции BIM в строительную отрасль

Fig. 2. The implementation of BIM concept in the construction industry



Рис. 3. Глобальное внедрение BIM

Fig. 3. A global overview of BIM adoption

В ряде стран, таких как Чехия, Грузия, Венгрия, Италия, Румыния, Франция, Армения, Австрия и Хорватия, внедрение BIM остается изолированным или сосредоточенным в секторе вертикального строительства. На Ближнем Востоке, за исключением Катара и Объединенных Арабских Эмиратов, государственный сектор не перешел к использованию BIM, и регион далек от прогресса в плане внедрения. Несмотря на широкое применение BIM в мире, его внедрение в развивающихся странах, включая Мьянму, сталкивается с серьезными препятствиями. Осведомленность о BIM высока только на этапе проектирования жизненного цикла здания, но крайне низка на этапах строительства и управления объектами, а количество исследований в данной области минимально. Кроме того, в этих странах отсутствует официальная поддержка и участие государства во внедрении BIM.

Текущее состояние внедрения BIM в Мьянме

В строительной отрасли Мьянмы преобладают традиционные методы строительства. Она характеризуется ограниченной технологической интеграцией и дефицитом квалифицированных специалистов, знакомых с передовыми методами строительства. Ускоренная урбанизация и недостатки инфраструктуры вызывают необходимость перехода к более эффективным строительным процедурам. Международные строительные компании, работающие в регионе, также сталкиваются с рядом трудностей, включая высокий уровень конкуренции, изменчивость глобальной экономики и особенности локальных условий принимающей страны. В связи с этим становится все более важным понимание определяющих факторов успеха при выборе методов входа на рынок и разработке стратегий развития после входа.

В начале 2010-х гг. наблюдался ограниченный, но растущий интерес к внедрению современных технологий в строительном секторе Мьянмы. Некоторые местные компании начали осваивать цифровые инструменты, в первую очередь ориентируясь на системы автоматизированного проектирования (САПР). Однако технология BIM, которая обеспечивает более целостный подход к управлению проектами, оставалась в значительной степени незнакома. Хотя страна не реализовала масштабных проектов с использованием BIM, значительная часть специалистов-практиков BIM из Мьянмы работает за рубежом, в частности в Юго-Восточной Азии, в Сингапуре. На данный момент можно утверждать, что развитие BIM в Мьянме в основном обусловлено усилиями частного сектора, а не государственной поддержкой.

Глобальное партнерство и появление иностранных предприятий в Мьянме способствовали значительному росту осведомленности о преимуществах BIM. Технологии BIM стали использоваться в крупномасштабных проектах, особенно в крупных городских центрах, таких как Янгон и Мандалай. Все более широкое внедрение программного обеспечения BIM стало одной из ключевых тенденций на рынке. Оно позволяет профессионалам области создавать 3D-модели зданий и сооружений, которые могут быть использованы для проектирования, строительства и технического обслуживания. Еще одной тенденцией на рынке является растущее использование облачного программного обеспечения, т. к. оно открывает доступ к данным из любой точки и с любого устройства. Это особенно

важно для специалистов, работающих на строительных площадках. Кроме того, государственное финансирование инфраструктурных проектов: мостов, дорог и аэропортов – создает благоприятные условия для развития рынка BIM в стране. В таблице представлен обзор программного обеспечения BIM, широко используемого в строительном секторе Мьянмы.

Рынок программного обеспечения BIM в Мьянме

The BIM software market in Myanmar

Программное обеспечение	Предполагаемый процент	Использование
Autodesk Revit	35	Широко признанное ведущее программное обеспечение BIM для архитекторов и инженеров
Archicad	15	Сильный конкурент на рынке BIM, пользующийся популярностью у архитекторов благодаря удобному интерфейсу
Tekla Structures	15	Известен своими возможностями в области проектирования конструкций и обработки стали
Sketchup (with BIM plugins)	10	Часто используется для первоначальных дизайнерских концепций и визуализации с дополнительными возможностями BIM с помощью плагинов
Navisworks	5	Часто используется для анализа проектов, координации и обнаружения противоречий
Bentley MicroStation	5	Используется для инфраструктурных проектов и совместим с различными инструментами проектирования
Grasshopper	5	Инструмент визуального программирования, работающий с Tekla Structures для параметрического моделирования
Dynamo	5	Инструмент визуального программирования, работающий с Revit для автоматизации и настройки
Vectorworks	5	Инструмент для разработки ландшафта, архитектурных объектов и интерьеров

По мере того как BIM набирает популярность, ряд значимых проектов в Мьянме демонстрируют возможности использования этой технологии для преодоления традиционных строительных барьеров. Так, Yoma Central (рис. 4) – флагманский проект многофункционального назначения в Янгоне – направлен на переосмысление городской среды. Проект включает в себя торговые заведения, офисы и роскошные дома. Он был создан совместно международными компаниями и специалистами из Мьянмы с использованием BIM для организации взаимодействия сторон. Применение технологии позволило минимизировать разногласия на этапе проектирования с помощью улучшения ком-

муникации и 3D-визуализации. Другим примером является проект Thingaha Resort, расположенный недалеко от Мандалая, созданный для организации туристического сервиса высокого класса. BIM был использован для повышения эффективности рабочего процесса и визуализации мельчайших деталей сложного архитектурного проекта. Однако следует отметить, что Мьянма отстает от своих соседей, особенно в вопросах институциональной и правительственной поддержки внедрения BIM и образования.

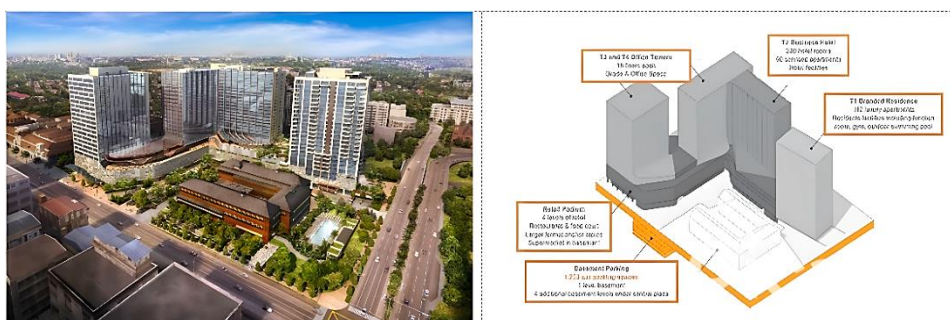


Рис. 4. Yoma Central проект использовал BIM для визуализации и координации
Fig. 4. The Yoma Central project utilized BIM for visualization and coordination

Моделирование инфраструктурного проекта в среде BIM

Для лучшего понимания особенностей внедрения BIM в Мьянме авторами и разработан предварительный проект шестиэтажной частной школы с использованием инструментов BIM для оптимизации процесса проектирования и проведен его анализ. Проект расположен в Нейпидо и учитывает особые экологические факторы, включая ветровые нагрузки и доступность материалов. Для создания целостного дизайна были использованы следующие инструменты BIM: Revit, SketchUp и SCAD. Здание спроектировано с учетом потребностей учащихся, преподавателей и административного персонала.

Процесс проектирования начался с создания 3D-архитектурной модели в SketchUp, что позволило быстро визуализировать планировку здания и сосредоточить внимание на оптимизации пространства и функциональности в образовательных целях. Затем была разработана линейная модель здания в AutoCAD для обеспечения точности структурной детализации и импортирована в SCAD для дальнейшего анализа. Для лучшей визуализации и создания подробных чертежей, рендеров и анимации конструкций модель была интегрирована в Revit (рис. 5). Такая плавная передача данных между платформами служит примером функциональной совместимости инструментов BIM. Учет и управление связями между многочисленными элементами проектирования является основным направлением моделирования в среде BIM [14].

Результаты показывают, что применение инструментов BIM позволило осуществить плавный переход от проектирования к анализу, повысив эффективность проекта. Использование SketchUp способствовало быстрому созданию прототипов и визуализации макета проекта, в то время как AutoCAD обеспечил точное структурное моделирование.

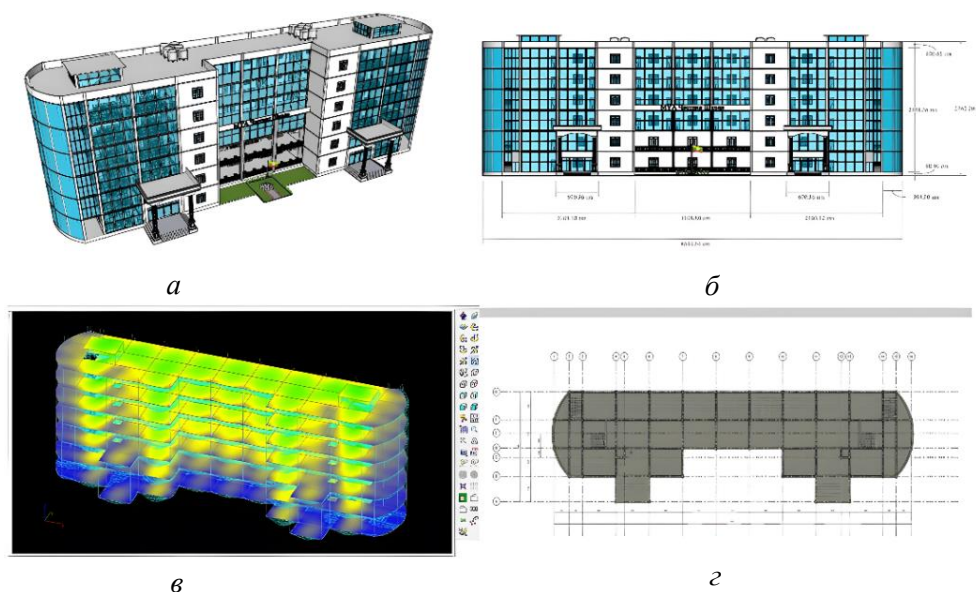


Рис. 5. Проектирование предлагаемой модели в инструментах BIM:

a – архитектурная модель в SketchUp; *б* – вид спереди в SketchUp; *в* – аналитическая модель в SCAD; *г* – поэтажный план в Revit

Fig. 5. The proposed model design in BIM tools:

a – architectural model in SketchUp; *b* – front view in Sketch; *c* – analysis model in SCAD; *d* – floor plan in Revit

Revit позволил эффективно управлять ресурсами, предлагая точные прогнозы и отслеживание материалов на протяжении всего жизненного цикла проекта. Интеграция файла DXF в SCAD дала возможность провести обширный структурный анализ в реальных условиях загрузки.

Результаты

Несмотря на позитивные перспективы, широкому внедрению BIM в Мьянме препятствуют несколько проблем, в числе которых недостаток квалифицированных кадров, культурное сопротивление и высокие затраты на внедрение. Однако будущее BIM в стране представляется многообещающим, чему способствуют текущие инвестиции в инфраструктуру и совершенствование нормативно-правовой базы. Для использования полного потенциала BIM авторы предлагают следующие рекомендации:

1. Укрепление образования и профессиональной подготовки. Для подготовки более квалифицированных специалистов необходимо расширение образовательных инициатив и партнерских отношений между учебными заведениями и участниками отрасли.

2. Государственные стимулы. Продвижению BIM эффективно через налоговые льготы для компаний, внедряющих цифровые технологии, финансирование исследований и разработок, а также предоставление государственных грантов на образовательные инициативы в области обучения BIM.

3. Повышение осведомленности. Проведение информационных кампаний, освещающих успешные проекты BIM и тематические исследования, будет способствовать популяризации технологии среди строительных фирм.

4. Фокус на устойчивость. Использование BIM для решения насущных проблем, связанных с урбанизацией, изменением климата и ухудшением состояния окружающей среды, путем внедрения устойчивых методов строительства.

Заключение

В статье представлен всесторонний обзор текущего состояния внедрения BIM в Мьянме. Несмотря на то, что внедрение технологии находится на начальной стадии, очевидно, что основы для ее роста уже заложены. Развивающийся строительный сектор страны, который стимулируется все большим количеством международных инвестиций, сотрудничеством и образовательными программами, имеет все возможности для использования передовых технологий, в частности BIM, для удовлетворения современных требований. Преодоление барьеров, особенно связанных с обучением, культурным сопротивлением и затратами, потребует совместных усилий государственного и частного секторов. Кроме того, крайне важно расширить вовлеченность частного сектора в финансируемые государством инфраструктурные проекты, включая работы по эксплуатации и техническому обслуживанию.

Поскольку Мьянма продолжает модернизировать свои методы строительства, BIM будет играть важную роль в формировании более эффективной, устойчивой и конкурентоспособной строительной отрасли. Путь к внедрению BIM является сложным, но потенциальные выгоды от реализации проекта в Мьянме огромны, поскольку технология закладывает основу для процветающей экономики. Предложенный проект служит моделью для внедрения BIM в развитие инфраструктуры образования, выстраивая путь к более разумным и экологичным методам строительства. В отличие от стандартных моделей САПР, предлагаемая BIM-модель способна содержать как геометрическую, так и семантическую информацию на всех этапах жизненного цикла здания. Полученные результаты подтверждают значительный потенциал BIM для будущих строительных проектов, особенно в развивающихся регионах, таких как Мьянма, где эффективное использование ресурсов и соблюдение стандартов безопасности имеют первостепенное значение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Вин Ко Мьинт Ту, Смирнова О.В.* Особенности влияния технического состояния транспортных сооружений на обеспечение транспортной безопасности грузоперевозок Республики Мьянма // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции, 30 мая 2024 г. Москва, 2024. С. 547–554. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-547-554
2. *Sonam R., Saeed B., Suhair A.* Driving digital transformation in construction: Strategic insights into building information modelling adoption in developing countries // Project Leadership and Society. 2024. V 5. DOI: 10.1016/j.plas.2024.100138
3. *Lihnida S.G., Ivana S., Aleksandar K., Hristina S., Margarita G., Igor P., Risto I., Ignasi P.A., Tomo C., Tomas F.* BIM in the Center of Digital Transformation of the Construction Sector–

- The Status of BIM Adoption in North Macedonia // *Buildings*. 2022. V. 12. I. 2. DOI: 10.3390/buildings12020218
4. Raja S.N., Cheng Z., Lu T. A BIM-based tool for assessing embodied energy for buildings // *Energy and Buildings*. 2018. V. 170. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.067
 5. Yujie L., Zhilei W., Ruidong C., Yongkui L. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions // *Automation in Construction*. 2017. V. 83. P. 134–148. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.024
 6. Nathalia F.A., Muhammad S. Recent progress on BIM-based sustainable buildings: State of the art review // *Developments in the Built Environment*. 2023. V. 15. DOI: 10.1016/j.dibe.2023.100176
 7. Mohammad N.U., Wei H.H., Hung-Lin C., Meng N., Perumal E. Building information modeling (BIM) incorporated green building analysis: an application of local construction materials and sustainable practice in the built environment // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2021. V. 6. DOI: 10.1007/s41024-021-00106-5
 8. Savio S.M., Ana E., Ahmed W.A.H., Vivian WY. T., Assed N.H. Evaluation of 4D BIM tools applicability in construction planning efficiency // *International Journal of Construction Management*. 2020. V. 22. I. 15. P. 2987–3000. DOI: 10.1080/15623599.2020.1837718
 9. Nwe N.M., Muhammad S. Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. V. 20. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03024
 10. Smirnova O.V., Smirnov K.V. Creating automation tools with BIM-programs for designing elements of metal bridges // *Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2017*. St. Petersburg, Russia, 2017. P. 773–775. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8085940>
 11. Carl M., Annlizé L.M. Digitalization of project management: Opportunities in research and practice // *Project Leadership and Society*. 2022. V. 3. DOI: 10.1016/j.plas.2022.100061
 12. Siavash G., Esmatullah N., Saied Y. BIM-based solution to enhance the performance of public-private partnership construction projects using copula bayesian network // *Expert Systems with Applications*. 2023. V. 216. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119501
 13. Muhammad S.R., Bassam A.T., Yazan I.A.A., Ahmed M.M. Potential features of building information modeling (BIM) for application of project management knowledge areas in the construction industry // *Heliyon*. 2023. V. 9. I. 9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19697
 14. Смирнова О.В., Вин Ко Мьинт Ту. Адаптивный подход к проектированию стальных мостов в Мьянме путем интеграции информационного и параметрического моделирования // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. Т. 26. № 6. С. 188–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-188-200

REFERENCES

1. Win Ko Myint Thu, Smirnova O.V. Influence of Technical Conditions of Transport Facilities on Cargo Transportation Safety in the Republic of Myanmar. In: *Proc. 3rd Int. Sci. Conf. 'Intelligent Transport Systems'*, Moscow. May 30, 2024, Pp. 547–554. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-547-554 (In Russian)
2. Sonam R., Saeed B., Suhair A. Driving Digital Transformation in Construction: Strategic Insights into Building Information Modelling Adoption in Developing Countries. *Project Leadership and Society*. 2024; 5. DOI: 10.1016/j.plas.2024.100138
3. Lihnida S.G., Ivana S., Aleksandar K., Hristina S., Margarita G., Igor P., Risto I., Ignasi P.A., Tomo C., Tomas F. BIM in the Center of Digital Transformation of the Construction Sector—The Status of BIM Adoption in North Macedonia. *Buildings*. 2022; 12 (2). DOI: 10.3390/buildings12020218
4. Raja S.N., Cheng Z., Lu T. A BIM-Based Tool for Assessing Embodied Energy for Buildings. *Energy and Buildings*. 2018; 170: 1–14. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.067
5. Yujie L., Zhilei W., Ruidong C., Yongkui L. Building Information Modeling (BIM) for Green Buildings: A Critical Review and Future Directions. *Automation in Construction*. 2017; 83: 134–148. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.024

6. Nathalia F.A., Muhammad S. Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings: State of the Art Review. *Developments in the Built Environment*. 2023; 15. DOI: 10.1016/j.dibe.2023.100176
7. Mohammad N.U., Wei H.H., Hung-Lin C., Meng N., Perumal E. Building Information Modeling (BIM) Incorporated Green Building Analysis: An Application of Local Construction Materials and Sustainable Practice in the Built Environment. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2021; 6. DOI: 10.1007/s41024-021-00106-5
8. Savio S.M., Ana E., Ahmed W.A.H., Vivian W.Y.T., Assed N.H. Evaluation of 4D BIM Tools Applicability in Construction Planning Efficiency. *International Journal of Construction Management*. 2020; 22 (1): 1–14. DOI: 10.1080/15623599.2020.1837718
9. Nwe N.M., Muhammad S. Embodied Carbon Emissions of Buildings: Taking a Step Towards Net Zero Buildings. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03024
10. Smirnova O.V., Smirnov K.V. Creating Automation Tools with BIM-Programs for Designing Elements of Metal Bridges. In: *Proc. 2017th Int. Conf. 'Qualit Management, Transport and Information Security, Information Technologies'*, Saint-Petersburg, Russia, 2017. Pp. 773–775. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8085940>
11. Carl M., Annлизé L.M. Digitalization of Project Management: Opportunities in Research and Practice. *Project Leadership and Society*. 2022; 3. DOI: 10.1016/j.plas.2022.100061
12. Siavash G., Esmatullah N., Saied Y. BIM-Based Solution to Enhance the Performance of Public-Private Partnership Construction Projects using Copula Bayesian Network. *Expert Systems with Applications*. 2023; 216. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119501
13. Muhammad S.R., Bassam A.T., Yazan I.A.A., Ahmed M.M. Potential Features of Building Information Modeling (BIM) for Application of Project Management Knowledge Areas in the Construction Industry. *Heliyon*. 2023; 9 (9). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19697
14. Smirnova O.V., Win K. Adaptive Approach to Steel Bridge Design in Myanmar by Integration of Information and Parametric Modeling. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (6): 188–200. (In Russian) DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-188-200

Сведения об авторах

Вин Ко Мьинт Ту, аспирант, Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, winkomyintthu@mail.ru

Хан Вей Тун, магистрант, Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, hanwaihtun6@gmail.com

Аркар Уе Хтет, магистрант, Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, rkaryehtetz150473@gmail.com

Ян Лин Аунг, магистрант, Российский университет транспорта (РУТ/МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, yanaung822016@gmail.com

Authors Details

Win Ko Myint Thu, Research Assistant, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., Build. 9, 127055, Moscow, Russia, winkomyintthu@mail.ru

Han Wai Htun, Graduate Student, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., Build. 9, 127055, Moscow, Russia, hanwaihtun6@gmail.com

Arkar Ye Htet, Graduate Student, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., Build. 9, 127055, Moscow, Russia, rkaryehtetz150473@gmail.com

Yan Lin Aung, Graduate Student, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., Build. 9, 127055, Moscow, Russia, yanaung822016@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.01.2025
Одобрена после рецензирования 18.02.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 10.01.2025
Approved after review 18.02.2025
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 133–143.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 133–143.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.82:624.07:69.07:692.843

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-133-143

EDN: SEIURX

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТКРЫТЫХ ПЛОЩАДОК РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА САЛЕХАРДА

Виктория Олеговна Киселёва, Виктория Александровна Мазур

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
г. Макеевка, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* В Российской Федерации наблюдается динамика роста количества резервуарных парков, требующих капитального ремонта конструкций открытых площадок. Недостаточная нормативная база по проектированию и устройству подобных конструкций приводит к необходимости применения норм проектирования противодиффузионных экранов полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных отходов, что существенно снижает эффективность проектирования и строительства, не гарантируя достаточной надежности.

На этапе проектирования конструкций открытых площадок необходимо учитывать различные сочетания нагрузок. Анализ существующих отечественных и зарубежных исследований конструктивных решений открытых площадок резервуарных парков выявил недостаточную разработку методов расчета снеговой нагрузки, учитывающих специфику снеготложения на площадках, особенно в северных регионах Российской Федерации. Отсутствие адекватной оценки данного фактора в сочетании с другими нагрузками (например, розлив нефтепродуктов) может привести к неравномерным деформациям несущего элемента конструкции и потенциально опасным последствиям, включая экологические риски. Это обуславливает актуальность исследования.

Цель. Проверка методики выбора конструктивного решения открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов на примере г. Салехарда, определение толщины несущего элемента и технико-экономическое обоснование выбранной конструкции площадок.

Методы. Применение комплексного подхода, включающего анализ существующих проблем, определение суммарной нагрузки на конструкцию открытых площадок с учетом схем расположения резервуаров в пределах парка, позволило достичь поставленной цели.

Результаты. Представлена методика выбора рациональных конструктивных решений открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов, полученная в процессе исследования. На основании методики определена толщина несущего элемента, ТЭП (трудоемкость и стоимость выполнения) рассматриваемого в работе конструктивного решения открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов с учетом разных схем расположения резервуаров в пределах парка г. Салехарда.

Ключевые слова: резервуар, открытые площадки, резервуарный парк, конструктивное решение, толщина несущего элемента, нагрузки, ТЭП

Для цитирования: Киселёва В.О., Мазур В.А. Реализация методики исследования конструкций несущих элементов открытых площадок резервуарных парков

нефтепродуктов на примере города Салехарда // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 133–143. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-133-143. EDN: SEIURX

ORIGINAL ARTICLE

METHODOLOGY IMPLEMENTATION OF LOAD-BEARING ELEMENTS OF TANK BATTERIES ON THE EXAMPLE OF SALEKHARD-CITY

Victoria O. Kiseleva, Victoria A. Mazur

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
Makeevka, Donetsk People's Republic, Russia*

Abstract. In the Russian Federation, there is a growing number of tank batteries requiring major repairs to outdoor structures. Insufficient regulatory framework for design and construction of such structures leads to the need to apply standards for the design of anti-filtration screens of landfills for toxic waste disposal, which significantly reduces the efficiency of design and construction, without guaranteeing sufficient reliability.

At the design stage of outdoor structures, it is necessary to take into account various loads. The analysis of Russian and foreign studies of structural solutions for open-air tank batteries shows insufficient development of snow load calculation methods that take into account the specifics of snow deposition at sites, especially in the northern regions of the Russian Federation. The lack of adequate assessment of this factor in combination with other loads (e.g., a spill of petroleum products) can lead to uneven deformation of the load-bearing structural element and potentially dangerous consequences, including environmental risks. This determines the relevance of the study.

Purpose: Verification of the methodology for choosing a constructive solution for open areas of tank batteries in the city of Salekhard, the thickness determination of the bearing element and feasibility study of the chosen site design.

Methodology: The integrated approach, determination of the total load on the construction of open areas, taking into account the layout of reservoirs within the park.

Research findings: The method of choosing rational constructive solutions is proposed for open areas of tank batteries. Based on this method, determined are the thickness of the bearing element, the labor intensity and cost of implementation of the constructive solution of the open areas of tank batteries with regard to different tank layout in Salekhard.

Keywords: tank battery, open area, constructive solution, bearing element thickness, load

For citation: Kiseleva V.O., Mazur V.A. Methodology Implementation of Load-Bearing Elements of Tank Batteries on the Example of Salekhard-City. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 133–143. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-133-143. EDN: SEIURX

Резервуарные парки хранения нефтепродуктов представляют собой особо опасные производственные объекты, требующие должной защиты окружающей среды от проникновения нефтепродуктов в грунты, и должны быть спроектированы с учетом максимальных сочетаний нагрузок для обеспечения долговечности и надежности конструкции. В связи с этим необходимо выполнить устройство открытых площадок с обязательным защитным покрытием, несущим элементом и изоляционным слоем.

Однако аварийные ситуации на действующих резервуарных парках нефтепродуктов [1, 2, 3], построенных в период с 1980 по 2000 г., представляют острую проблему сохранения целостности конструкций. Разгерметизация резервуаров и нефтепродуктопроводов часто приводит к нарушению целостности полов открытых площадок и обрушению обвалования (ограждения), вызывая масштабные экологические катастрофы. Примеры таких последствий – утечка дизельного топлива из резервуара в Норильске в мае 2020 г., приведшая к загрязнению нескольких тысяч тонн грунта и рек Амбарной и Далдыкан, а также загрязнение снега и почвы площадью 20 000 м² в Якутии в январе 2010 г. из-за разрыва трубы нефтепровода. Представленные экологические катастрофы непосредственно связаны с разрушением, деформациями или полным отсутствием конструкций открытых площадок (полов каре) и обвалования (ограждения) резервуарных парков.

В процессе исследования было выявлено, что недостаточная изученность в области нагрузок на несущие элементы открытых площадок приводит к деформациям конструкций [4, 5, 6], нарушению целостности изоляционного слоя, что способствует проникновению нефтепродуктов в грунт и формированию застойных зон, содержащих нефтепродукты (включая последствия аварий резервуаров) и дождевую воду. Это существенно усложняет процесс ликвидации техногенных аварий.

В результате выполненных ранее исследований установлено, что при определении значений нагрузок, влияющих на открытые площадки резервуарных парков, помимо аварийных (розлив нефтепродуктов) нагрузок и собственного веса конструкции следует принимать во внимание транспортные и снеговые нагрузки [7].

В работе предлагается методика, направленная на разработку рациональных конструктивных решений несущих элементов открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов, обеспечивающих их надежность при различных нагрузках и минимизирующих риски экологических последствий.

Методика исследования конструкции открытых площадок (рис. 1) включает в себя следующие этапы:

1. Выбор схемы расположения резервуаров в пределах парка (количество и объем резервуаров, расстояние между ними), определение площади открытых площадок и высоты ограждения (обвалования).
2. Разработка конструктивного решения открытых площадок с учетом требований прочности, надежности, пожарной и экологической безопасности.
3. Сбор нагрузок на конструкцию открытых площадок с учетом корректирующего коэффициента снеговой нагрузки.
4. Определение ширины раскрытия трещин и толщины несущего железобетонного элемента.
5. Оценка трудоемкости и стоимости выполнения работ при устройстве конструкции открытых площадок с учетом разной схемы расположения резервуаров в пределах парка.

Согласно методике, в работе определяется суммарная нагрузка, влияющая на конструкцию полов открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов для различных регионов Российской Федерации (рис. 2).

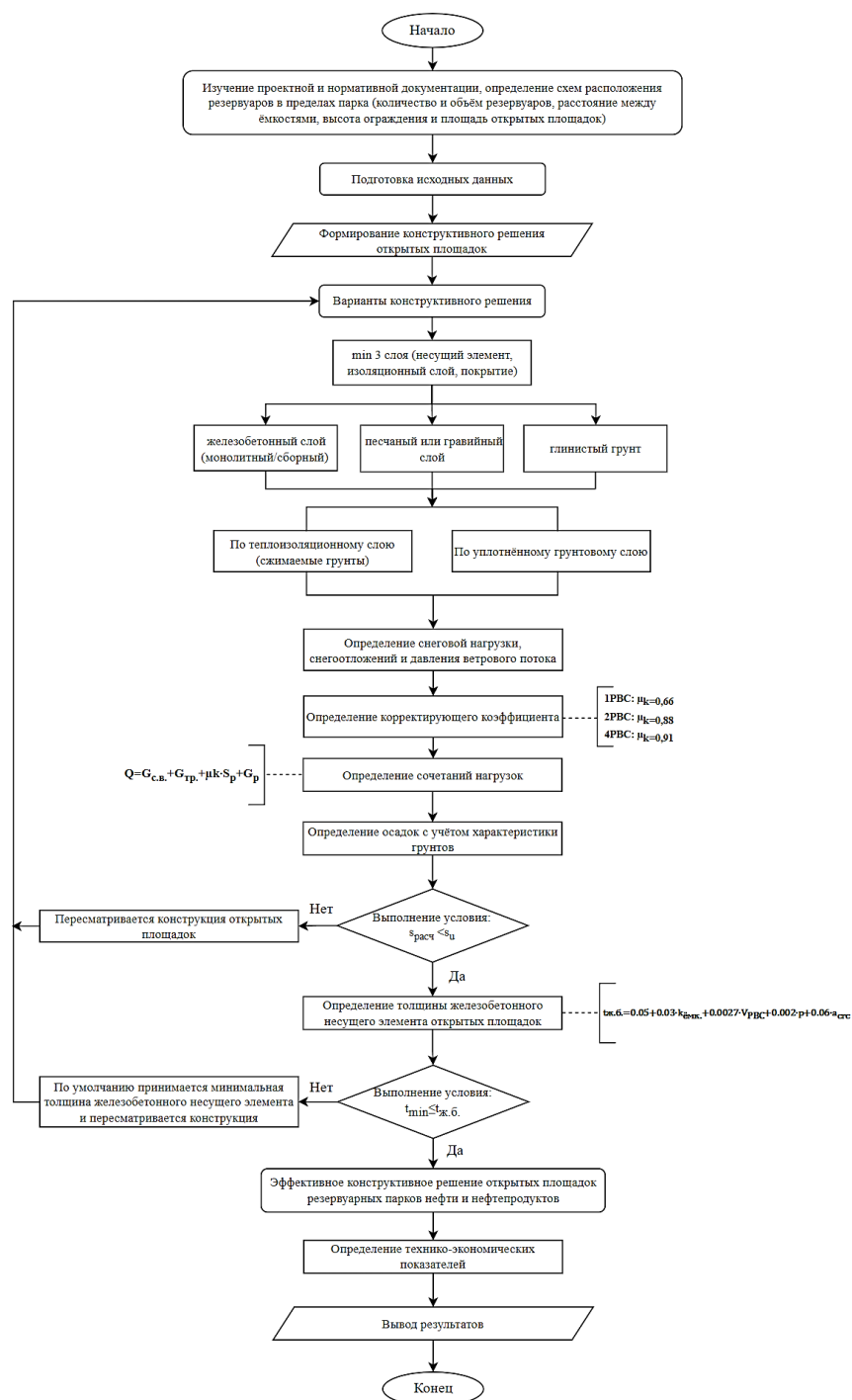


Рис. 1. Методика выбора рациональных конструктивных решений открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов

Fig. 1. Selection of rational constructive solutions for open areas of petroleum products tank batteries

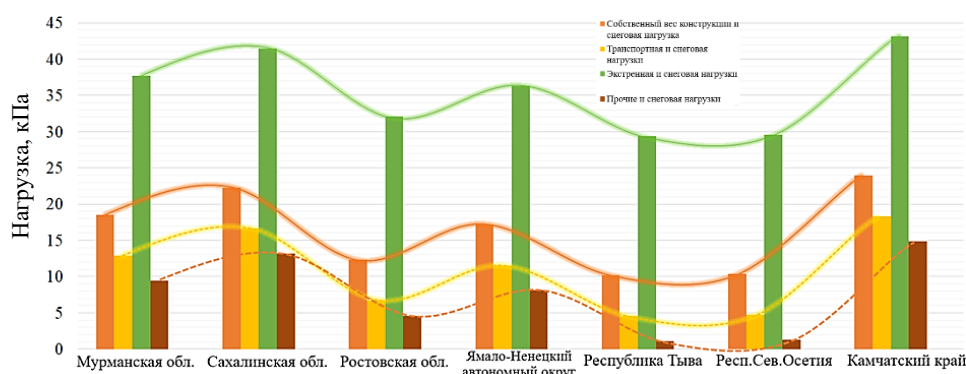


Рис. 2. Диаграмма сочетания нагрузок холодных и теплых регионов Российской Федерации
Fig. 2. Diagram of combined loads in cold and warm regions of the Russian Federation

Наиболее значимыми сочетаниями нагрузок для конструкций открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов являются аварийные и снеговые. В холодных регионах, при совместном воздействии данных нагрузок с учетом деформации основания грунтов, возможно разрушение конструкции открытых площадок при неверно подобранном конструктивном решении и недостаточной толщине несущего элемента.

Проверка методики выполняется на примере г. Салехарда, находящегося в V снеговом районе¹. Схемы расположения резервуаров в пределах парка принимаются в виде одной (рис. 3, а) и четырех емкостей (рис. 3, б) объемом 30 000 м³.

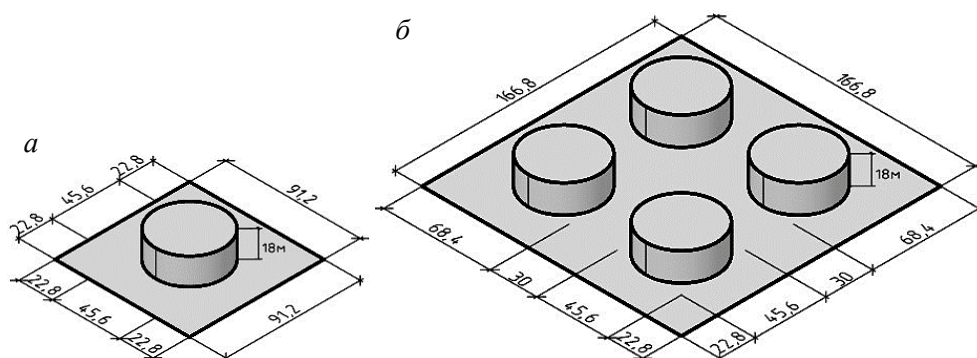


Рис. 3. Схемы расположения резервуаров в пределах парка объемом 30 000 м³:
а – один резервуар; б – четыре резервуара

Fig. 3. Tank battery layouts within the 30 000 m³ area:
а – one tank; б – four tanks

Значения площадей открытых площадок и высот ограждений рассчитаны согласно СП 155.13130.2014² и представлены в табл. 1.

¹ СП 20.133330.2016. Нагрузки и воздействия. Москва: Стандартинформ, 2018. 95 с.

² СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности. Москва: МЧС России, 2014. 42 с.

Таблица 1

Значения площади открытых площадок и высоты ограждения резервуарных парков в зависимости от схемы расположения резервуаров в пределах парка

Table 1

Open areas and height of tank battery fencing, depending on their layout

Варианты устройства резервуаров в пределах парка	Площадь открытых площадок, м ²	Высота ограждения, м
1 резервуар РВС-30 000 (1 РВС с $D = 45,6$ м, $h_{ст} = 18$ м)	8317,44	4,69
4 резервуара РВС-30 000 (4 РВС с $D = 45,6$ м, $h_{ст} = 18$ м)	27 822,24	1,51

В процессе исследования для рассматриваемого города получена снеговая нагрузка с корректирующим коэффициентом, равная 2,65 кПа при устройстве одиночного резервуарного парка и 3,63 кПа – для четырех емкостей.

На рис. 4 представлен исходный вариант шестислойного конструктивного решения с принятым грунтовым покрытием, изоляционным слоем в качестве бентонитовых матов и железобетонным несущим элементом, выполненным по утеплителю.



Рис. 4. Конструктивное решение открытой площадки резервуарного парка
Fig. 4. Constructive solution of the open area of the tank battery

Характеристики нагрузки от собственного веса конструкции открытых площадок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Нагрузка от собственного веса конструкции открытых площадок на 1 м²

Table 2

Dead load of structure in open areas per 1 m²

Нагрузка	Нормативная нагрузка, кН/м ² (кПа)	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетная нагрузка, кН/м ² (кПа)
Грунтовый слой $t = 0,3$ м, $\rho = 1600$ кг/м ³	4,8	1,3	6,24
Геотекстиль (2 слоя), $\rho = 0,6$ кг/м ²	0,012	1,1	0,0132
Бентонитовые маты $\rho = 4,8$ кг/м ²	0,047	1,2	0,056
Железобетонный слой $t = 0,3$ м, $\rho = 2500$ кг/м ³	7,5	1,1	8,25
Утеплитель минвата $t = 0,1$ м, $\rho = 220$ кг/м ³	0,22	1,2	0,264
Итого	12,58		14,82

Согласно полученным результатам, нагрузка от собственного веса рассматриваемой конструкции составляет 14,82 кПа.

Установлено, что в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 формула определения нагрузки на конструкцию открытых площадок определяется следующим образом:

$$Q = G_{с.в} + G_{тр} + \mu_k \cdot S_p + G_p \cdot \Psi, \quad (1)$$

где $G_{с.в}$ – нагрузка от собственного веса конструкций открытых площадок, кПа; $G_{тр}$ – транспортная нагрузка, равная 4,4 кПа; μ_k – корректирующий коэффициент снеговой нагрузки; S_p – расчетная снеговая нагрузка, кПа; G_p – нагрузка от разлива нефти и нефтепродуктов, кПа; Ψ – коэффициент сочетаний для временных длительных нагрузок.

Расчетная снеговая нагрузка определяется путем умножения значений снеговой нагрузки, полученной по результатам физического опыта ($S_{сн}$) на коэффициент надежности по нагрузке для перехода с нормативных значений к расчетным (γ_f).

Аварийная нагрузка, зависящая от объемов разлива нефти и нефтепродуктов, определяется для худших условий в зависимости от соотношения полного объема одного резервуара 30 000 м³, количества емкостей в группе, плотности нефти 0,86 г/см³ по отношению к площади открытых площадок, кПа:

$$q_{авар} = G_p \cdot \Psi = \frac{V_{РВС} \cdot n \cdot \rho}{S_{откр.пл}} \Psi, \quad (2)$$

где $V_{РВС}$ – объем резервуара, м³; n – количество резервуаров, шт.; ρ – плотность нефти, кг/м³; $S_{откр.пл}$ – площадь открытой площадки, м².

Подставляя значения в формулу, получим для одного резервуара $q_{\text{авар}} = 32,53$ кПа, для четырех – $q_{\text{авар}} = 38,91$ кПа.

Следовательно, нагрузка, действующая на конструкцию открытых площадок одиночного и группового резервуарного парка для г. Салехарда, имеет вид

$$Q_{\text{РВС}} = 14,82 + 4,4 + 2,65 + 32,53 = 54,4 \text{ кПа};$$

$$Q_{4\text{РВС}} = 14,82 + 4,4 + 3,63 + 38,91 = 61,76 \text{ кПа}.$$

В результате исследований получены графики (рис. 5), позволяющие в зависимости от нагрузки и схем расположения резервуаров в пределах парка определить толщину несущего элемента открытых площадок с учетом допустимой ширины раскрытия трещин.

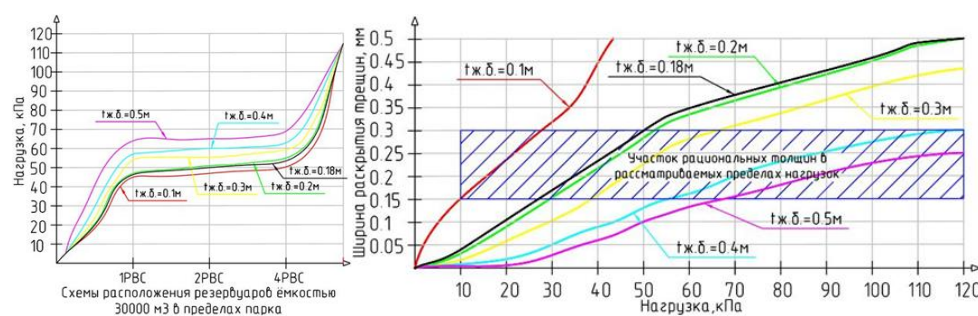


Рис. 5. Определение ширины раскрытия трещин железобетонного несущего элемента открытых площадок для резервуарных парков объемом 30 000 м³

Fig. 5. Determination of crack opening width of reinforced concrete load-bearing element of open areas for tank batteries with 30 000 м³ capacity

Так, по результатам определения ширины раскрытия трещин значение имеет вид для 1 РВС 30000 $a_{\text{срс}} = 0,24$ мм; для 4 РВС 30000 $a_{\text{срс}} = 0,18$ мм.

Оптимальная толщина железобетонного несущего элемента открытых площадок определяется согласно формуле, представленной в работе [8].

Для резервуарных парков объемом 30 000 м³ толщина несущего элемента открытых площадок составляет:

$$t_{\text{ж.б.1РВС}} = 0,05 + 0,03 \cdot 1 + 0,0027 \cdot 30 + 0,002 \cdot 54,4 + 0,06 \cdot 0,24 = 0,28 \text{ м};$$

$$t_{\text{ж.б.4РВС}} = 0,05 + 0,03 \cdot 4 + 0,0027 \cdot 30 + 0,002 \cdot 61,76 + 0,06 \cdot 0,18 = 0,39 \text{ м}.$$

В процессе исследования были получены формулы определения трудоемкости и стоимости выполнения работ по устройству конструкции открытых площадок резервуарных парков [9].

Так, для одиночных резервуарных парков объемом 30 000 м³ трудоемкость и стоимость составляют:

$$T_1 = -6044,44 + 626,35k_{\text{сл}} + 5729t_{\text{сл}} + 172,87V_{\text{РП}} = \\ = -6044,44 + 626,35 \cdot 6 + 5729 \cdot 0,28 + 172,87 \cdot 30 = 4504,08 \text{ чел.-дн.};$$

$$C_1 = -15493,2 + 1350,17k_{\text{сл}} + 19433,5t_{\text{сл}} + 459,67V_{\text{РП}} = \\ = -15493,2 + 1350,17 \cdot 6 + 19433,5 \cdot 0,28 + 459,67 \cdot 30 = 11839,3 \text{ тыс. руб.}$$

Для четырех емкостей в резервуарном парке объемом 30 000 м³ трудоемкость и стоимость имеют вид:

$$T_2 = -10993,2 + 1167,11k_{\text{сл}} + 13232t_{\text{сл}} + 2072,06k_{\text{емк}} + 171,08V_{\text{РП}} =$$

$$= -10993,2 + 1167,11 \cdot 6 + 13232 \cdot 0,39 + 2072,06 \cdot 4 + 171,08 \cdot 30 = 14590,58 \text{ чел.-дн.};$$

$$C_2 = -28214,4 + 2515,85k_{\text{сл}} + 42383,5t_{\text{сл}} + 5572,13k_{\text{емк}} + 454,91V_{\text{РП}} =$$

$$= -28214,4 + 2515,85 \cdot 6 + 42383,5 \cdot 0,39 + 5572,13 \cdot 4 + 454,91 \cdot 30 =$$

$$= 39346,09 \text{ тыс. руб.},$$

где $k_{\text{сл}}$ – количество слоев, шт.; $t_{\text{сл}}$ – толщина несущего элемента открытых площадок, м; $V_{\text{РП}}$ – объем резервуарного парка, тыс. м³; $k_{\text{емк}}$ – количество емкостей в резервуарном парке, шт.

Итоговые значения применения методики для г. Салехарда представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты применения методики для Салехарда

Table 3

Methodology application in Salekhard

Схема расположения резервуаров в пределах парка	Нагрузка Q, кПа	Ширина раскрытия трещин $a_{\text{трс}}$, мм	Толщина несущего элемента $t_{\text{ж.б.}}$, мм	Трудоемкость, чел.-дн.	Стоимость, тыс. руб.
1 РВС 30 000	54,4	0,24	280	4504,08	11 839,3
4 РВС 30 000	61,76	0,18	390	14 590,58	39 346,09

По результатам проведенной работы определены значения толщины несущего элемента и выполнена оценка технико-экономических показателей устройства конструкций открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов для г. Салехарда.

Установлено, что для одиночного резервуарного парка толщина несущего элемента составляет 280 мм, а для четырех емкостей – 390 мм. Трудоемкость и стоимость работ при устройстве открытых площадок группового резервуарного парка, состоящего из четырех емкостей объемом 30 000 м³, практически в 3 раза превышают соответствующие показатели для одиночного резервуарного парка.

Разработанная методика выбора рациональных конструктивных решений открытых площадок резервуарных парков нефтепродуктов позволит проектировщикам и специалистам эксплуатирующих организаций принимать обоснованное конструктивное решение открытых площадок резервуарных парков, минимизируя риски и оптимизируя затраты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каблов В.Ф., Иощенко Ю.П. Проблема сбора нефти и нефтепродуктов при аварийных разливах // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 64–65. EDN: IUMFWH
2. Корнеев В.С., Аксенов С.Г. Анализ возникновения и последствий аварий, происходящих на резервуарных парках // E-Scio. 2023. № 9 (84). С. 234–238. EDN: UTYUMO

3. Бурмакова А.В., Смелов В.В., Захаров А.А. Реализация математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2018. № 1 (206). С. 82–87. EDN: YXBEPD
4. Green P.A., Hight D.W. The failure of two oil-storage tanks caused by differential settlement // Proc. Conference on settlement of structures. London, Pentech Press. 1975. P. 353–360.
5. Bell R.A., Iwakiri J. Settlement comparison used in tank failure study // Proc. ASCE. 1980. V. 106. № GT2. P. 153–169.
6. Иванов Ю.К., Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н. Основания и фундаменты резервуаров. Москва : Стройиздат, 1989. 223 с. ISBN 5-274-00556-X.
7. Киселёва В.О., Мазур В.А. Моделирование работы несущего основания полов каре резервуарных парков на слабых грунтах // Научные труды КубГТУ : электронный сетевой политематический журнал. 2024. № 3. С. 36–45. DOI: 10.26297/2312-9409.2024.3.4. EDN: MRYMKG
8. Мазур В.А., Киселёва В.О. Определение рациональной толщины бетонного основания пола каре резервуарных парков хранения нефти и нефтепродуктов на водонасыщенных грунтах // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2023. № 6 (164). С. 11–18. EDN: MSRKVO
9. Мазур В.А., Киселёва В.О. Влияние конструктивных решений полов каре на технико-экономические показатели их устройства с учётом ёмкости резервуарных парков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 6 (158). С. 41–48. EDN: ZJEMBT

REFERENCES

1. Kablov V.F., Ishchenko Yu.P. Collection of Oil and Petroleum Products in Case of Emergency Spills. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2004; (6): 64–65. EDN: IUMFWH (In Russian)
2. Korneev V.S., Aksenov S.G. Analysis of Occurrence and Consequences of Accidents at Tank Batteries. *E-Scio*. 2023; 9 (84): 234–238. EDN: UTYUMO (In Russian)
3. Burmakova A.V., Smelov V.V., Zakharov A.A. Implementation of Mathematical Model for Predicting Consequences of Emergency Strait. *Trudy BGTU. Ser. 3: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika*. 2018; 1 (206): 82–87. EDN: YXBEPD (In Russian)
4. Green P.A., Hight D.W. The Failure of Two Oil-Storage Tanks Caused by Differential Settlement. In: *Proc. Conf. on Settlement of Structures*. London: Pentech Press, 1975. Pp. 353–360.
5. Bell R.A., Iwakiri J. Settlement Comparison used in Tank Failure Study. *Proc. ASCE*. 1980; 106 (GT2): 153–169.
6. Ivanov Yu.K., Kononov P.A., Mangushev R.A., Sotnikov S.N. Bases and Foundations of Reservoirs. Moscow: Stroyizdat, 1989. 223 p. ISBN 5-274-00556-X. (In Russian)
7. Kiseliova V.O., Mazur V.A. Modeling the Operation of Bearing Base of Floors of Tank Batteries on Loose Soils. *Electronic journal Nauchnye trudy KuBGTU*. 2024; (3): 36–45. DOI: 10.26297/2312-9409.2024.3.4. EDN: MRYMKG (In Russian)
8. Mazur V.A., Kiseliova V.O. Rational Thickness of Floor Concrete Base of Tank Batteries for Storing Oil and Petroleum Products on Water-Saturated Soils. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2023; 6 (164): 11–18. EDN: MSRKVO (In Russian)
9. Mazur V.A., Kiseliova V.O. Influence of Square Floor Structures on Technical and Economic Parameters of their Construction Accounting for Tank Battery Capacity. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2022; 6 (158): 41–48. EDN: ZJEMBT (In Russian)

Сведения об авторах

Киселёва Виктория Олеговна, ассистент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, v.o.kiseliova@donnasa.ru

Мазур Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, v.a.mazur@donnasa.ru

Authors Details

Victoria O. Kiseliova, Assistant Lecturer, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, Russia, v.o.kiseliova@donnasa.ru

Victoria A. Mazur, PhD, A/Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, Russia, v.a.mazur@donnasa.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.04.2025
Одобрена после рецензирования 14.05.2025
Принята к публикации 30.05.2025

Submitted for publication 18.04.2025
Approved after review 14.05.2025
Accepted for publication 30.05.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 144–155.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 144–155.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-144-155

EDN: SBIAIH

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Наталья Олеговна Копаница, Владислав Игоревич Паймухин

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования связана с возможностью повышения прочностных свойств цементобетона за счет использования механически активированного вяжущего.

Цель работы заключается в оценке закономерностей и особенностей процессов гидратации механоактивированного портландцемента на ранних стадиях твердения.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены с использованием сырьевых материалов, соответствующих требованиям действующих нормативных документов. В качестве вяжущего применялся портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Б производства ООО «Топкинский цемент».

Результаты. Представлены результаты физико-механических испытаний механически активированного цементного камня. Установлено, что совместная механоактивация цементного вяжущего с песком карьерной влажности в активаторе собственной конструкции обеспечивает повышение прочностных характеристик цементного камня на ранних сроках твердения. Конструкция активатора позволяет регулировать мощность и продолжительность измельчения. Наибольший эффект достигается при мощности двигателя 3000 Вт и времени обработки смеси в течение 5 мин.

Приведены результаты физико-химических исследований особенностей процесса гидратации вяжущего с применением рентгенофазового и колориметрического анализа.

Ключевые слова: активация, цементное тесто, механическая активация, модификация, вяжущее, цементные композиции, цементный камень

Для цитирования: Копаница Н.О., Паймухин В.И. Исследование свойств механически активированного цементного камня // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 144–155. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-144-155. EDN: SBIAIH

ORIGINAL ARTICLE

PROPERTIES OF MECHANICALLY ACTIVATED HYDRATED CEMENT

Natal'ya O. Kopanitsa, Vladislav I. Paimukhin

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. *Purpose:* Evaluation of hydration mechanisms of mechanically activated Portland cement at early curing stages.

Methodology: Calorimetry of thermal effects during cement curing, X-ray diffraction analysis, XRD patterns are analyzed in Difrac.EVA software program, including the ICDD PDF2 database for the analysis of the phase composition, coherent scattering regions, internal elastic stresses.

Research findings: It is shown that mechanically activated cement binder together with sand of quarry moisture content in the activator provide an increase in strength properties of hydrated cement during its early curing. The activator design allows control for the power and time of grinding. The greatest effect is provided at the engine power of 3000 W and the mixture processing for 5 min. The results of physical and chemical analyses of the binder hydration process are presented using X-ray phase and colorimetric analysis.

Keywords: activation, cement paste, mechanical activation, modification, binder, cement compositions, hydrated cement

For citation: Kopanitsa N.O., Paimukhin V.I. Properties of Mechanically Activated Hydrated Cement. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 144–155. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-144-155. EDN: SBIAIH

Введение

Механическая активация (механоактивация) компонентов бетонной смеси применяется для увеличения реакционной способности (изменение физико-химических свойств) обрабатываемых веществ в последующих процессах и реакциях в результате механического воздействия. Механоактивация позволяет увеличить удельную поверхность дисперсных частиц цемента, приводит к изменению их поверхностной структуры, возникновению физических дефектов в подрешетках минералов, ускоряющих и усиливающих взаимодействие поверхностного слоя с водой [1, 2].

Механоактивация вяжущего основана на изменении его реакционной способности под действием механических сил, что приводит к ускорению или повышению эффективности химических, физико-химических или технологических процессов при механических воздействиях на материал [3, 4].

Активация измельчением относится к числу технически более доступных методов, которые сопровождают процесс структурообразования в материале. Она позволяет повысить реакционную способность твердого тела за счет возникновения дефектов кристаллической структуры и формирования активного

состояния развитой поверхности дисперсных материалов, обеспечивая возможность повышения прочностных характеристик цементного камня [5, 6, 7, 9]. Для осуществления процесса механоактивации используют мельницы (активаторы) различных типов: шаровые, пружинные, центробежные, вибрационные и др. При этом эффективность механической активации зависит от выбранного типа активатора и от свойств измельчаемых продуктов [8].

Целью исследования является оценка закономерностей и особенностей процессов гидратации механоактивированного портландцемента на ранних сроках твердения.

Материалы и методы исследований

При проведении экспериментальных исследований в работе использовались сырьевые материалы, соответствующие требованиям нормативных документов. В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Б ООО «Топкинский цемент». Характеристики вяжущего удовлетворяют требованиям ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» и ГОСТ 30515–2013 «Цементы. Общие технические условия». Свойства цемента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики портландцемента

Table 1

Portland cement properties

Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания ч-мин		Предел прочности, МПа	Класс цемента	Содержание минеральных добавок, %
	Начало	Конец	Сжатие 28 сут		
26,0	2:30	3:50	51,4	ЦЕМ I 42,5Б	20

В качестве заполнителя использовался кварцевый песок Кудровского месторождения Томской области, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Физико-механические свойства используемого для проведения исследований песка приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики кварцевого песка Кудровского месторождения

Table 2

Properties of quartz sand from Kudrovskoe deposit

Содержание гра-вия, %	Частные (полные) остатки, % на ситах, мм					Содержание пылеватых и глинистых частиц, %	Модуль крупности	Плотность, кг/м ³	
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16			насыпная	истинная
–	<u>0,5</u> 0,5	<u>1,0</u> 1,5	<u>4,5</u> 6,0	<u>35,0</u> 41,0	<u>53,5</u> 94,5	3,0	2,1	1390	2600

Механоактивация цементного вяжущего совместно с влажным песком осуществлялась в активаторе роторного типа собственной конструкции, с по-

мощью которого возможно повысить тонкость помола цемента, что способствует получению высококачественной тонкозернистой структуры. В этой связи для современного строительного материаловедения вновь становится актуальной механохимическая активация компонентов бетона, в частности цементно-песчаной смеси.

Для оценки закономерностей и особенностей процессов гидратации механоактивированного портландцемента на ранних стадиях твердения была проведена колориметрическая оценка тепловых эффектов при твердении активированного портландцемента в сравнении с контрольными образцами. Для проведения исследований готовились образцы-кубики размером $2 \times 2 \times 2$ мм из смесей с различным соотношением компонентов: 1:1, 1:2, а также 2:1. Продолжительность твердения составляла 3 сут, а время активации варьировалось в пределах 2,5 и 5 мин. Образцы-кубики в возрасте 3 сут измельчались в агатовой ступке до состояния пудры. В качестве оборудования для исследования тепловыделения в цементных системах использовался дифференциальный микрокалориметр (ДМК). ДМК состоит из двух калориметрических ячеек (КЯ), размещенных в индивидуальных теплоизолирующих сосудах, что исключает возможность теплообмена между ними. Каждая КЯ снабжена единичными датчиками температуры в виде спая термопары или термометра сопротивления. Сигнал от датчиков передается по дифференциальной (термопара) или уравновешенной мостовой (термометр сопротивления) схемам и регистрируется через аналоговый цифровой преобразователь (АЦП) на компьютере [12]. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Bruker D2 Phaser. Перед началом анализа пробы подготавливались измельчением в агатовой ступке до состояния пудры, после чего плотно помещались в кювету из органического стекла. Поверхность пробы выравнивалась до уровня с кюветой. Расшифровка полученных дифрактограмм проводилась при помощи программы Diffrac.EVA, которая включает базы данных рентгеновской порошковой дифрактометрии PDF2 Международного центра дифракционных данных (ICDD, Denver, USA).

Результаты исследования

В работе [10] были представлены результаты исследований механохимической активации цемента и песка карьерной влажности при их совместной обработке в определенных соотношениях. Влажный ($W = 4-8\%$) песок совместно с вяжущим подвергался механической активации поверхности путем одновременного удаления пылевидных примесей без заметного измельчения зерен. Для оценки эффективности процесса активации в работе определялись оптимальные режимы помола исследуемой смеси. Полученный продукт может быть представлен как потенциальная добавка в бетонную смесь, выполняющая функцию прекурсора для стимуляции процессов гидратации цемента на ранних этапах, ускоряющая процесс набора прочности бетонной смеси.

Для проведения испытаний использовался активатор роторного типа собственной конструкции, позволяющий повысить тонкость помола цемента и, как следствие, обеспечить получение высококачественной тонкозернистой структуры. Это подчеркивает актуальность применения механохимической активации компонентов бетона, в частности цементно-песчаной смеси.

Анализ экспериментальных данных [10] показал, что совместная активация цемента и песка карьерной влажности в соотношении 1:2 способствует росту прочностных характеристик цементно-песчаного раствора. Наибольший прирост прочности достигается при мощности двигателя активатора 3000 Вт и времени обработки смеси в течение 5 мин. Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 1.

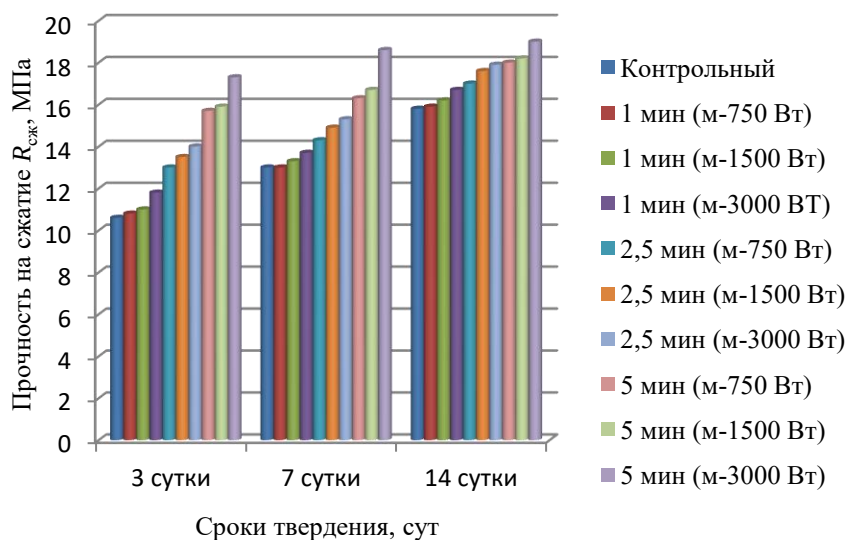


Рис. 1. Прочностные характеристики образцов в зависимости от времени активации и мощности двигателя

Fig. 1. Strength properties of samples depending on activation time and engine powder

Показано, что наибольший прирост прочности достигается при мощности двигателя 3000 Вт и времени обработки смеси, равном 5 мин. Прочность на ранних стадиях твердения (в течение 5 мин при указанной мощности) увеличивается на 7,5 % по сравнению с контрольными образцами.

Таким образом, полученные данные по оценке прочностных характеристик цементного камня с добавкой (прекурсор), полученной при совместном измельчении цемента с влажным песком, показывают высокую эффективность предложенного способа активации. Подготовка добавки происходит непосредственно в процессе приготовления бетонной смеси, т. е. включается в общую технологическую цепочку. Это обеспечивает активацию процессов гидратации цемента на ранних стадиях твердения бетонной смеси, способствуя улучшению физико-механических характеристик материала.

Для исследования физико-химических особенностей влияния полученной добавки на процесс гидратации вяжущего был применен колориметрический метод анализа. Реакции гидратации цементных минералов являются экзотермическими, и взаимодействие цемента с водой сопровождается выделением теплоты [11, 13].

Кривые тепловыделения системы приведены на рис. 2–7.

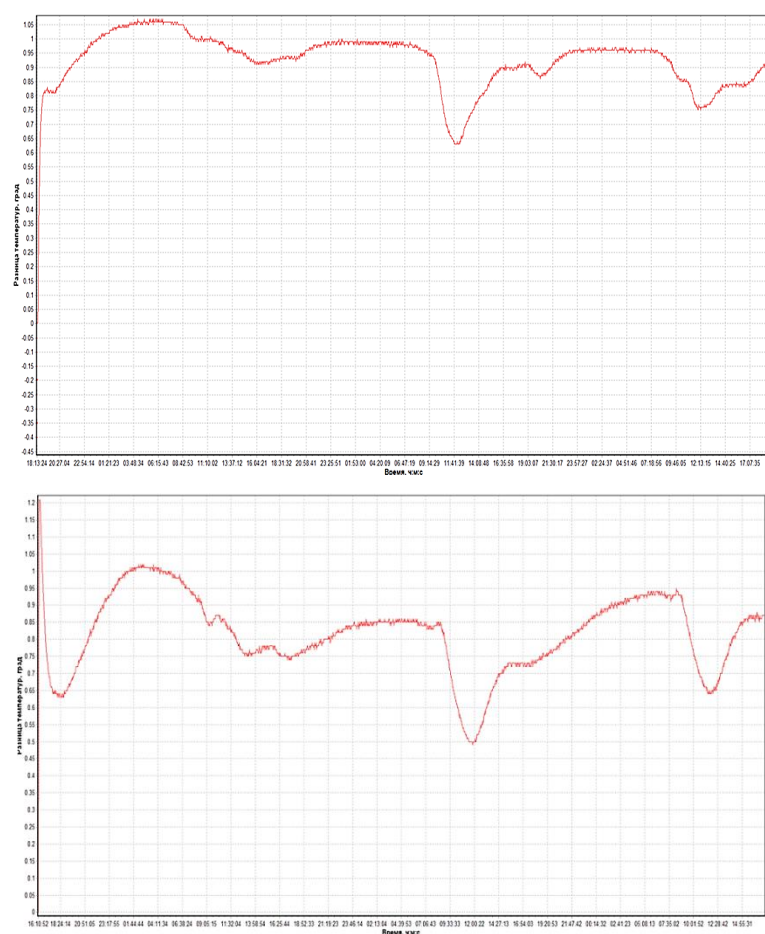


Рис. 2. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:1 В/Ц = 0,4 (3 сут), $\tau = 0$ мин; 2,5 мин
Fig. 2. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:1 and water/cement 0.4 (3 days), $\tau = 0$ and 2.5 min

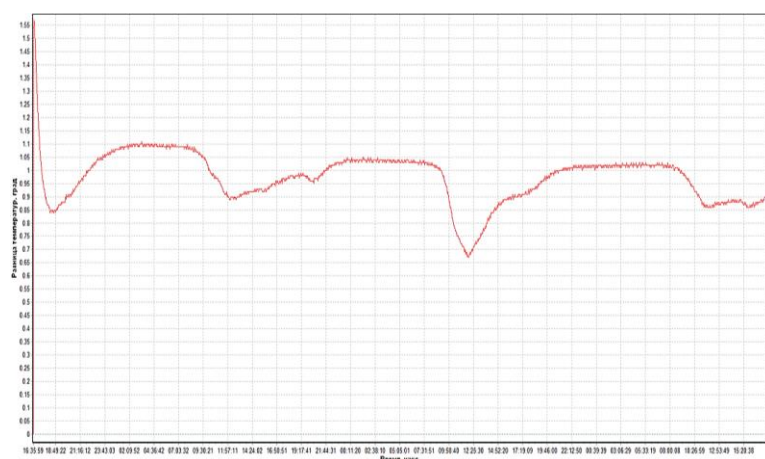


Рис. 3. Кривая тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:1 В/Ц = 0,4 (3 сут), $\tau = 5$ мин
Fig. 3. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:1 and water/cement 0.4 (3 days), $\tau = 5$ min

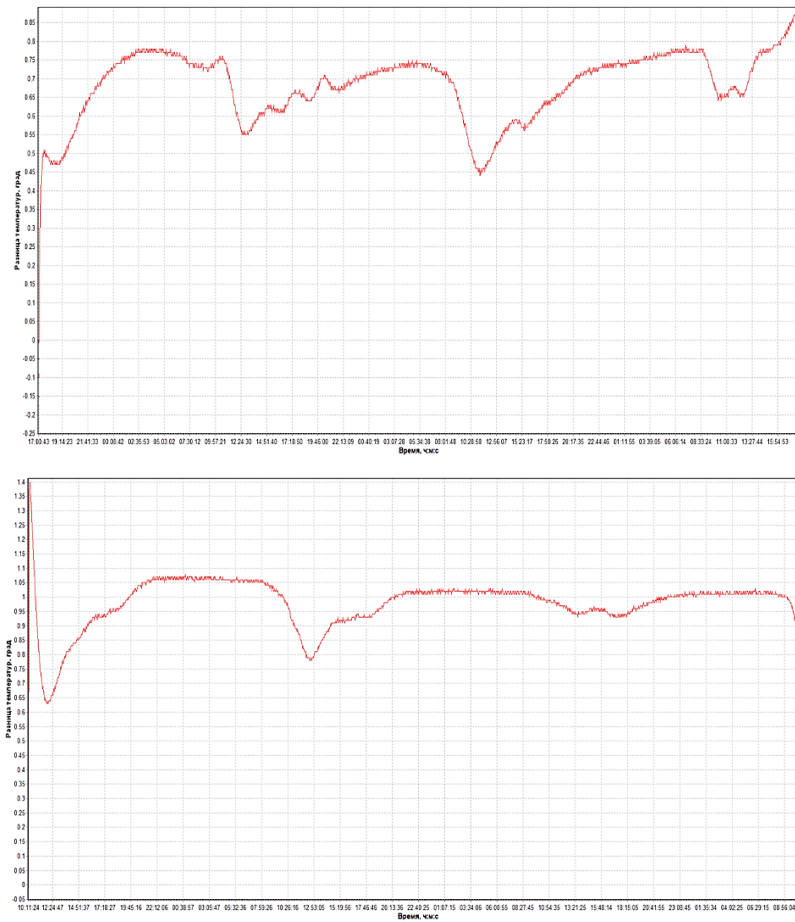


Рис. 4. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:2 В/Ц = 0,4 (3 сут), $\tau = 0$ мин; 2,5 мин
 Fig. 4. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:2 and water/cement 0.4 (3 days), $\tau = 0$ and 2.5 min

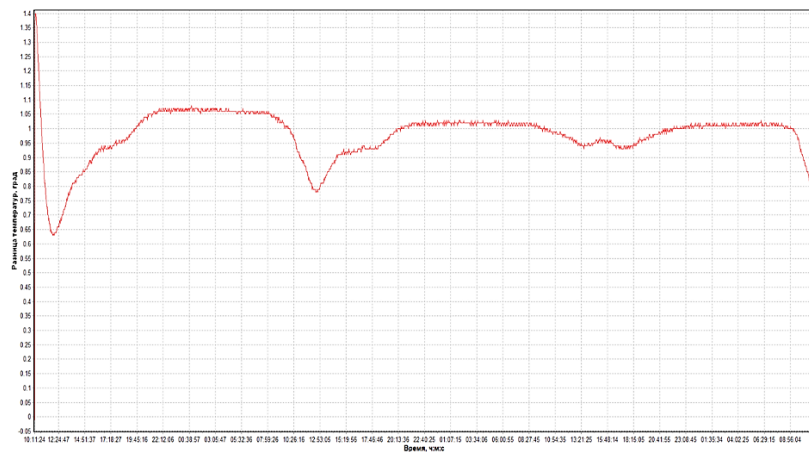


Рис. 5. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:2 В/Ц = 0,4 (3 сут), $\tau = 5$ мин
 Fig. 5. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:2 and water/cement 0.4 (3 days), $\tau = 5$ min

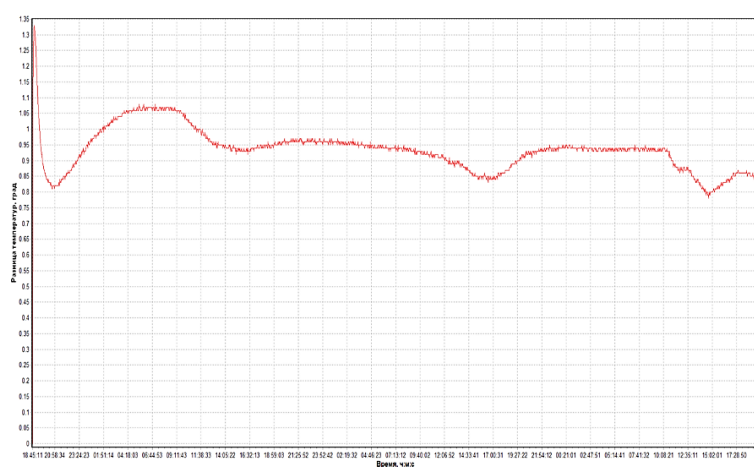
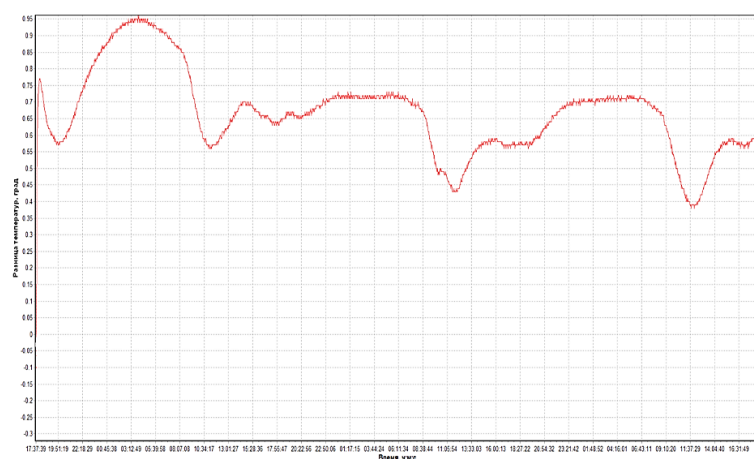


Рис. 6. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 2:1 В/Ц = 0,4 (3 сут), $\tau = 5$ мин
Fig. 6. Heat release curve at ratios: cement/sand 2:1 and water/cement 0.4 (3 days), $\tau = 5$ min

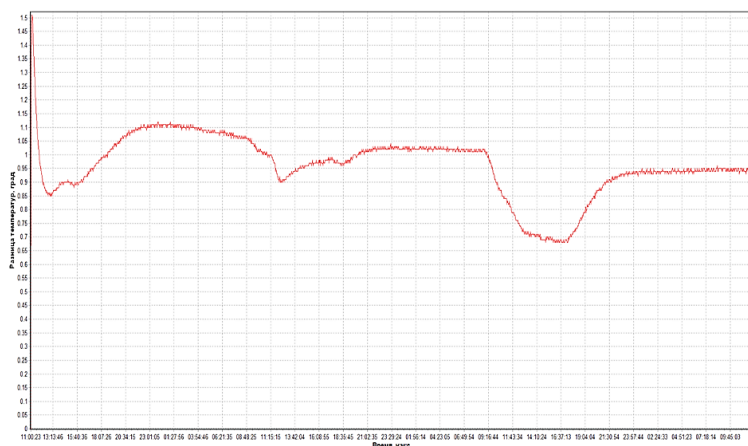


Рис. 7. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 2:1 В/Ц = 0,4 (3 сут), $\tau = 0$ мин; 2,5 мин
Fig. 7. Heat release curve at ratios: cement/sand 2:1 and water/cement 0.4 (3 days), $\tau = 2.5$ min

Тепловыделение при смачивании цемента водой стимулирует развитие процессов гидролиза C_3S , сопровождающихся образованием гидроксида кальция. Реакция гидролиза и теплота смачивания (левая часть максимума тепловыделения при смачивании) являются своеобразным энергетическим импульсом для запуска процессов гидратации цемента [14].

Цикличность процессов гидратации и диспергирования при тепловыделении обусловлена периодичностью процессов накопления коллоидных продуктов гидратации и их перекристаллизации в более компактное состояние, сопровождающееся высвобождением свободной воды в системе.

Расчет теплоты смачивания цементно-песчаной смеси при различном соотношении компонентов и времени активации представлен в табл. 3.

Таблица 3

Теплота смачивания цементно-песчаной смеси

Table 3

Heat of wetting of cement-sand mix

Состав	Время активации, мин		
	0	2,5	5
Ц:П = 1:1	$Q_{см} = 5,205 \text{ Дж}$	$Q_{см} = 7,681 \text{ Дж}$	$Q_{см} = 9,902 \text{ Дж}$
Ц:П = 1:2	$Q_{см} = 3,240 \text{ Дж}$	$Q_{см} = 8,894 \text{ Дж}$	$Q_{см} = 12,387 \text{ Дж}$
Ц:П = 2:1	$Q_{см} = 4,883 \text{ Дж}$	$Q_{см} = 8,433 \text{ Дж}$	$Q_{см} = 9,575 \text{ Дж}$

Представленные данные показывают, что изменение температуры цементно-песчаной смеси при контакте с водой протекает аналогично чистому цементу. Однако после первого индукционного периода механизм взаимодействия цемента с водой в смеси с песком существенно изменяется, что сопровождается увеличением разности температур материала в ячейках до 0,50–0,80 °С. Такая разность поддерживается в течение длительного времени.

Это объясняется тем, что образование продуктов гидратации цемента происходит не только за счет протекания процессов гидратации самого цемента, но и дополнительно в результате химических реакций образования гидросиликатов кальция при взаимодействии активированных нанодисперсных частиц цементного вяжущего с кварцевым песком. Это, в свою очередь, приводит к увеличению теплоты смачивания в активированной системе «цемент – песок – вода» (табл. 3). Из данных табл. 3 следует, что наибольшее увеличение теплоты смачивания цементно-песчаной смеси наблюдается при соотношении компонентов 1:2. Для выявления кристаллических фаз, формирующих структуру цементного камня, и оценки изменения интенсивности существующих фаз в исследуемых системах был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) цементно-песчаного камня (рис. 8).

Анализ дифрактограмм показывает, что основными фазами активированного цементно-песчаного камня являются: кварц, гидросиликаты состава $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ и $2CaO \cdot SiO_2 \cdot 4H_2O$, гидроалюминаты, гидроферриты кальция, а также этtringит. На основании проведенного РФА отмечается интенсивный рефлекс гидроалюмината кальция после 5 мин активации, что объясняет повышенные значения прочности активированного цементного камня.

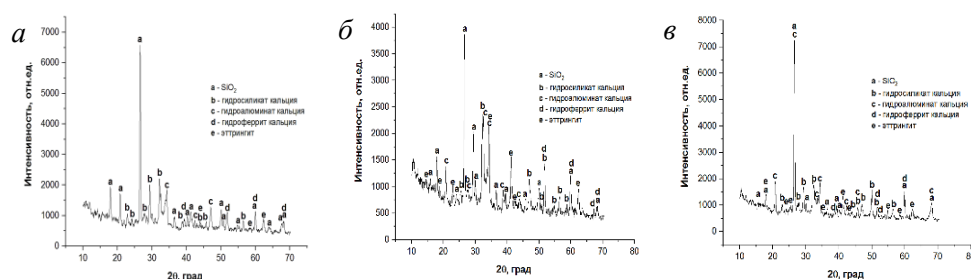


Рис. 8. РФА активированного цементно-песчаного камня:

a – контрольный; *б* – время активации 2,5 мин; *в* – время активации 5 мин

Fig. 8. XRD patterns for activated hydrated cement:

a – reference; *b* – activation time 2.5 min; *c* – activation time 5 min

Заключение

В ходе исследования были изучены физико-химические особенности влияния полученной добавки на процессы гидратации вяжущего в ранние сроки твердения.

Предложенная добавка (прекурсор), полученная в результате совместного измельчения цемента с влажным песком, готовится непосредственно в процессе приготовления бетонной смеси, что позволяет интегрировать данный этап в общую технологическую цепочку. Полученная добавка активирует процессы гидратации цемента на ранних стадиях твердения бетонной смеси, что способствует повышению ее прочностных характеристик.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния разработанной добавки на физико-технические свойства получаемой бетонной смеси и затвердевшего бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцева Н.Л. Исследование изменения физико-химических свойств портландцемента при измельчении : специальность 05.23.05 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1967. 15 с.
2. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective polyfunctional additive for composite materials based on cement // Digital technologies in construction engineering Selected Papers. Series Title Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. V. 173. P. 125–131. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8
3. Голик В.И., Полухин О.Н., Дзапаров В.Х. Феномен активации вяжущих свойств веществ в дезинтеграторе // Сухие строительные смеси. 2015. № 1. С. 21–23.
4. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 3. С. 203–216. EDN: HSQIOV
5. Болдырев В.В., Авакумов Е.Г., Болдырева Е.В. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий. Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 2009. 343 с. ISBN 978-5-7692-1063-1.
6. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62). С. 3–12. 148. DOI: 10.5862/MCE.62.1
7. Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. Симферополь : Таврия, 1997. 180 с.

8. Аввакумов Е.Г., Гусев А.А. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. Новосибирск : Акад. изд-во «Гео», 2009. 155 с.
9. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Самченко С.В., Козлова И.В., Лукьянова Н.А. Влияние способов активации на структурно-технологические характеристики наномодифицированных цементных композиций // *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. Т. 14. № 6. С. 481–492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492. EDN: PFYSQZ
10. Паймухин В.И. Анализ способов активации компонентов бетонной смеси // *Материалы 69-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2023. С. 6–8.
11. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Физико-химические процессы при активации цементно-песчаной смеси в центробежном смесителе // *Известия вузов. Физика*. 2011. Т. 54. № 11 (3). С. 346–349.
12. Патент № 2475714 Российская Федерация, G01K17/08. Дифференциальный микрокалориметр и способ измерения тепловыделения : № 2010139028/28 : заявл. 20.03.2012 : опубл. 20.02.2013 / Иванов Ю.А., Лотов В.А. ; заявитель и патентообладатель ООО «Техноаналит». Бюл. № 5. 9 с.
13. Лотов В.А., Сударев Е.А., Иванов Ю.А. Тепловыделение в системе цемент-вода при гидратации и твердении // *Строительные материалы*. 2011. № 11. С. 35–37.
14. Сударев Е.А. Интенсификация процессов гидратации и твердения цемента при механохимической и химической активации : специальность 05.17.11 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2012. 22 с.

REFERENCES

1. Kudryavtseva N.L. “Changes in physical and chemical properties of Portland cement during grinding”. PhD Abstract, Moscow, 1967. 15 p. (In Russian)
2. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective Polyfunctional Additive for Composite Materials Based on Cement. In: *Selected Papers “Digital Technologies in Construction Engineering. Ser. Lecture Notes in Civil Engineering”*. 2022; 173: 125–131. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8
3. Golik V.I., Polukhin O.N., Dzaparov V.Kh. Phenomenon of Activation of Binding Properties of Substances in Disintegrator. *Sukhie stroitel'nye smesi*. 2015; (1): 21–23. (In Russian)
4. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and Mechanical Activation of Solids. *Uspekhi Khimii*. 2006; 75 (3): 203–216. EDN: HSQIOV (In Russian)
5. Boldyrev V.V., Avvakumov E.G., Boldyreva E.V. Fundamentals of Mechanical Activation, Mechanochemistry and Mechanochemical Technologies. Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie RAN, 2009. 343 p. ISBN 978-5-7692-1063-1. (In Russian)
6. Ibragimov R.A., Pimenov S.I. Influence of Mechanochemical Activation on Cement Hydration Processes. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2016; 2 (62): 3–12. 148. (In Russian)
7. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Influence of Mechanochemical Activation of Binder on Properties of Fine-Grained Concrete. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2016; 62 (2): 3–12. DOI: 10.5862/MCE.62.1 (In Russian)
8. Fedorkin S.I. Mechanical Activation of Secondary Raw Materials in Building Material Production. Simferopol: Tavriya, 1997. 180 p. (In Russian)
9. Avvakumov E.G. Mechanical Activation Methods in Processing Natural and Man-Made Raw Materials. Novosibirsk: “Geo”, 2009. 155 p. (In Russian)
10. Kopanitsa N.O., Dem'yanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Luk'yanova N.A. Influence of Activation Methods on Structural and Technological Properties of Nano-modified Cement Composition. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2022; 14 (6): 481–492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492. EDN: PFYSQZ (In Russian)
11. Paimukhin V.I. Analysis of Activation Methods of Concrete Mix Components. In: *Proc. 69th Univ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists*. S.V. Efimenko, Ed., Tomsk: TSUAB, 2023. Pp. 6–8. (In Russian)
12. Lotov V.A., Sudarev E.A., Kutugin V.A. Physicochemical Processes during Activation of Cement-Sand Mixture in a Centrifugal Mixer. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2011; 54 (11/3): 346–349 (In Russian)

13. *Ivanov Yu.A., Lotov V.A.* "Differential microcalorimeter and method for measuring heat release". Patent Russ. Fed. No. 2475714. 2013. 9 p. (In Russian)
14. *Lotov V.A., Sudarev E.A., Ivanov Yu.A.* Heat release in Cement-Water System during Hydration and Curing. *Stroitel'nye materialy*. 2011; (11): 35–37. (In Russian)
15. *Sudarev E.A.* "Intensification of cement hydration and hardening processes with mechanochemical and chemical activation". PhD Abstract. Tomsk, 2012. (In Russian)

Сведения об авторах

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kopanitsa@mail.ru

Паймухин Владислав Игоревич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, v.i.paimukhin@yandex.ru

Authors Details

Natal'ya O. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

Vladislav I. Paimukhin, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, v.i.paimukhin@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.04.2025
Одобрена после рецензирования 25.04.2025
Принята к публикации 05.05.2025

Submitted for publication 10.04.2025
Approved after review 25.04.2025
Accepted for publication 05.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 156–171.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 156–171.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-156-171

EDN: SBGXMZ

ЭФФЕКТИВНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ РЕСПУБЛИКИ ХАКАСИЯ

**Екатерина Евгеньевна Ибе, Святослав Евгеньевич Миронов,
Галина Николаевна Шибаева**

Хакасский технический институт –

филиал Сибирского федерального университета, г. Абакан, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Накопление отходов производства и потребления является одной из наиболее острых экологических проблем современности. В России ежегодно образуется большое количество отходов, которые часто складываются или захораниваются, не вовлекаясь в хозяйственный оборот. Одним из перспективных направлений использования промышленных отходов является их применение в производстве строительных материалов.

Цель. Исследование влияния комплексных выгорающих добавок на улучшение строительно-технических свойств эффективного керамического кирпича.

Материалы и методы. В работе использовалась глина, древесные опилки, технический гидролизный лигнин, зола-унос. Изготовление образцов производилось методом полусухого прессования. Физико-механические свойства изделий определены по стандартным методикам.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния добавок на свойства керамического кирпича. Определены средняя плотность, теплопроводность и огневая усадка полученных керамических изделий.

Выводы. Результаты исследования подтверждают перспективность использования комплексной добавки лигнина с опилками для производства эффективной керамики. При этом содержание добавки не должно превышать 20 % от общей керамической массы.

Ключевые слова: керамика, отходы, лигнин, выгорающие добавки, теплопроводность, утилизация, керамические изделия, плотность

Для цитирования: Ибе Е.Е., Миронов С.Е., Шибаева Г.Н. Эффективная керамика на основе местного сырья органических отходов Республики Хакасия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 156–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-156-171. EDN: SBGXMZ

ORIGINAL ARTICLE

EFFICIENT CERAMICS BASED ON ORGANIC WASTE OF THE REPUBLIC OF KHAKASSIA

Ekaterina E. Ibe, Svyatoslav E. Mironov, Galina N. Shibaeva

Khakassian Technical Institute, SibFU Affiliate, Abakan, Russia

Abstract. The problem of accumulation of production and consumption waste is one of the most acute environmental problems of today. In Russia, a large amount of waste is generated annually, which is often stored or buried instead of being involved in an economic turnover. One of the promising areas for using industrial waste is the production of building materials.

Purpose: The study of complex burnout additives to improve construction and technical properties of effective ceramic bricks.

Methodology: Clay, wood sawdust, technical hydrolysis lignin, fly ash are used in experiments. The samples are produced by semi-dry pressing. Physical and mechanical properties of products are determined according to standard methods.

Research findings: Determination of the effect of additives on the properties of ceramic bricks. The average density, thermal conductivity and fire shrinkage of the obtained ceramic products are determined. Research findings confirm the prospects of using a complex additive of lignin with sawdust for the production of effective ceramics. In this case, the additive content should not exceed 20 % of the total ceramic mass.

Keywords: ceramics, waste, lignin, burnout additives, thermal conductivity, recycling, ceramic product, density

For citation: Ibe E.E., Mironov S.E., Shibaeva G.N. Efficient Ceramics Based on Organic Waste of the Republic of Khakassia. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 156–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-156-171. EDN: SBGXMZ

Введение

Отходы производства и потребления стали серьезной экологической проблемой, приводящей к загрязнению и разрушению экосистем. Массовое производство и потребление, особенно в развитых странах, способствуют росту объемов отходов, многие из которых разлагаются на протяжении сотен лет, создавая длительное негативное воздействие на окружающую среду.

Согласно статье № 21 ФЗ «Об отходах производства и потребления»¹, одним из основных принципов экономического регулирования в области обращения с отходами является уменьшение количества отходов и вовлечение их в хозяйственный оборот.

Однако, несмотря на законодательные инициативы, данные Росприроднадзора² отражают продолжающийся рост объемов отходов. К концу 2022 г. на территории нашей страны образовалось около 9000 млн т промышленных и бытовых отходов, что на 6,7 % превышает показатели предыдущего года. Основная доля пришлось на производственные отходы, при этом только 4100 млн т

¹ Об отходах производства и потребления: федеральный закон. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901711591> (дата обращения: 18.07.2024).

² О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году: государственный доклад. URL: <https://2022.ecology-gosdoklad.ru/> (дата обращения: 18.07.2024).

из них были утилизированы или обезврежены. Оставшиеся отходы были складированы, захоронены или вывезены на свалки. К концу 2022 г. объем захороненных отходов вырос почти в 2,5 раза по сравнению с прошлыми годами и достиг 2400 млн т (рис. 1).



Рис. 1. Динамика объема образования, утилизации и захоронения отходов производства в Российской Федерации

Fig. 1. Dynamics of the volume of formation, utilization and disposal of industrial waste in the Russian Federation

Эти данные подтверждают, что после временного спада в 2020 и 2021 гг. рост количества отходов снова возобновился. В России сохраняется проблема недостаточного развития экологически чистых технологий для переработки промышленных отходов, что препятствует их эффективному использованию и затрудняет переход к принципам устойчивого развития.

Учеными не раз отмечалось, что многие виды промышленных отходов могут быть использованы как альтернатива природным ресурсам. В некоторых случаях такие отходы обладают уникальными свойствами, которые делают их ценным сырьем. Применение техногенных отходов позволяет сохранить или снизить стоимость получения строительных материалов с улучшенными свойствами, оказывая положительное влияние на экологическое состояние окружающей среды [1, 2, 3].

Примером таких отходов может служить гидролизный лигнин. В XX в. гидролизная промышленность активно развивалась и использовала невостробованное сырье для производства ценных продуктов. Однако эта отрасль столкнулась с проблемой образования большого количества отходов, в частности лигнина, количество которого часто превышало объем полезной продукции.

В Усть-Абаканском районе Республики Хакасия находится полигон с лигнином. Лигнинохранилище функционировало на протяжении всего срока работы гидролизного завода. Несмотря на закрытие предприятия более 15 лет назад, территория с лигнином остается нетронутой. В настоящее время объем лигнина на полигоне превышает 3 млн м³ (рис. 2).

Полигон представляет экологическую угрозу, поскольку летом лигнин способен самовозгораться, выделяя едкий дым и смог, который распространяется на близлежащие территории, включая частный сектор. Такая ситуация не только ухудшает экологическое состояние региона, но и создает угрозу здоровью населения. Так, был зарегистрирован случай, когда ребенок упал в тлеющий лигнин и получил ожоги рук и ног. Это подчеркивает необходимость поиска решений для безопасного использования и утилизации лигнина.



Рис. 2. Полигон с лигнином в Усть-Абакане. Вид со спутника
Fig. 2. The landfill with lignin in Ust-Abakan. Satellite view

Технический гидролизный лигнин

Технический гидролизный лигнин – это органический полимер, образующийся в результате гидролиза растительного сырья, такого как древесина или сельскохозяйственные отходы. Процесс гидролиза представляет собой химическую реакцию, при которой полисахариды (целлюлоза и гемицеллюлоза) разлагаются на более простые соединения, в том числе лигнин. Внешне лигнин имеет вид рыхлой массы темно-коричневого цвета (рис. 3).



Рис. 3. Технический гидролизный лигнин
Fig. 3. Technical hydrolysis lignin

В своей работе автор [4] отмечает многокомпонентность состава гидролизного лигнина, включающего в себя полисахариды, смолы, редуцирующие вещества и ряд других компонентов. Гранулометрический состав этого материала может широко варьироваться в зависимости от условий производства,

что определяет колебания его вещественного состава и свойств в некотором интервале (табл. 1).

Таблица 1

Вещественный состав лигнина заводов Восточной Сибири [4]

Table 1

Lignin composition of Eastern Siberia factories

Гидролизный завод	Содержание веществ, %					
	в твердых отходах			в водном экстракте		
	Лигнин	Полисахариды	Экстрагируемые	H ₂ SO ₄	Резецирующие	Зольные остатки
Усть-Абаканский	61,7–64,1	18,0–19,9	12,4–14,1	1,8–2,4	4,2–5,0	3,0–3,8
Красноярский	62,3–63,0	15,7–17,6	13,2–14,3	1,6–1,9	5,3–5,9	2,4–2,7

Авторы [5] подчеркивают, что поверхность лигнинохранилища лишена растительности и признаков живых организмов, это указывает на полную биостойкость лигнина, стабильность химического состава и показателей кислотности. На полигоне материал постепенно теряет влагу, ее доля снижается до 20–25 % на поверхности, однако на глубине полуметра остается на уровне 28 %.

В работе [6] показано, что гидролизный лигнин обладает пористой структурой и имеет небольшую среднюю плотность в сухом состоянии. Лигнин также имеет низкий показатель теплопроводности, что делает его эффективным теплоизоляционным материалом.

Автор [4] отмечает, что при равной пористости материал обладает более высокой насыпной и истинной плотностью и меньшей склонностью к набуханию при увлажнении по сравнению с древесными опилками (табл. 2).

Таблица 2

Набухание, плотность и пустотность лигнина [4]

Table 2

Lignin swelling, density and voids

Материалы	Набухание, %, в течение времени, ч			Истинная плотность, г/см ³	Пустотность, %	Насыпная плотность, кг/м ³
	6	24	48			
Древесные опилки	5,0	5,6	6,0	1,25	84	161
Технический лигнин гидролизных заводов						
Усть-Абаканского	0,1	0,45	0,82	1,35	75	260
Красноярского	0,2	0,5	0,95	1,30	77	240

Сегодня гидролизный лигнин активно применяется в различных промышленных секторах. Основные направления его использования включают производство строительных материалов, дорожное строительство, нефтедобычу и другие сферы [7, 8, 9].

Эффективные керамические материалы

Согласно ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камни керамические», к группе эффективной керамики относят легкие пустотелые керамические изделия со средней плотностью керамического черепка в интервале 1010–1200 кг/м³. При этом теплопроводность кладки не должна превышать 0,36 Вт/(м·°С). Изделия, попадающие в интервал 810–1000 кг/м³ и имеющие теплопроводность кладки свыше 0,20 до 0,24 Вт/(м·°С), относят к группе повышенной эффективности.

В аналитическом обзоре³ отмечено, что производство таких изделий позволяет снизить потребление сырья на 25–30 % и расход топлива на 10–15 % по сравнению с использованием традиционного полнотелого кирпича. Благодаря низкой теплопроводности эффективной керамики толщина наружных ограждающих конструкций уменьшается на 20–30 %.

Авторы [10] утверждают, что пористая керамика может быть создана с использованием выгорающих добавок. Эти добавки уменьшают усадку изделий при сушке и обжиге, заменяя традиционные отошители. Улучшая свойства материалов, выгорающие добавки также снижают затраты на производство.

Анализ научных исследований показывает, что в качестве выгорающих добавок предлагаются опилки, древесная мука, торф, льняной кострец, шелуха злаков, рисовая солома, лигнин, различные виды углей и продуктов коксования, горючие сланцы, полимерные и стекольные отходы, полые полимерные гранулы (полистирол) и др. [11–17].

Авторами [18] отмечается возможность использования органических отходов в качестве выгорающих добавок при производстве пористой керамики.

Применение лигнина в производстве кирпича известно с середины прошлого века. Ленинградский кирпичный завод № 1 использует этот материал в качестве выгорающей добавки на протяжении 75 лет, что помогает снижать себестоимость продукции [19].

Материалы и методы исследований

При проведении экспериментальных исследований были использованы следующие материалы: глина, древесные опилки, гидролизный лигнин Усть-Абаканского гидролизного завода, зола-унос Абаканской ТЭЦ, вода.

Составы анализируемых керамических масс с различным содержанием глины и местного сырья представлены в табл. 3.

В настоящем исследовании использована смесь желтой и черной глины Черногорского месторождения (15 км юго-западнее г. Черногорска, Республика Хакасия). Согласно результатам работы [20], наилучшее соотношение данных глиен составляет 1:1. Химический состав глинистой смеси приведен в табл. 4.

Рентгенофазовый анализ (рис. 4) образца глины проводился на приборе BrukerD8 с линейным детектором VANTEC на CuK α излучении в диапазоне углов 5–80, с шагом 0,014° со временем накопления по 1 с на шаг. Уточнение

³ Верещагин В.И., Алексеев Ю.И., Погребенков В.М. Диопсидовые породы – универсальное сырье для производства керамических и других силикатных материалов // Промышленность строительных материалов. Сер. 5. Аналитический обзор. 1990. Вып 2. С. 60–64.

проводилось методом Ритвельда в программе TOPAS 3 (рис. 5). Содержание основных компонентов в образце глины приведено в табл. 5.

Таблица 3

Составы анализируемых керамических масс

Table 3

Composition of analyzed ceramics

Компо- ненты	Наименование состава и содержание компонентов, масс. %								
	Γ^{90} Оп ¹⁰	Γ^{80} Оп ²⁰	Γ^{90} Л ¹⁰	Γ^{80} Л ²⁰	Γ^{80} З ¹⁰	Γ^{80} З ²⁰	Γ^{80} Оп ¹⁵ Л ⁵	Γ^{80} Оп ¹⁰ Л ¹⁰	Γ^{80} Оп ⁵ Л ¹⁵
Глина	90	80	90	80	90	80	80	80	80
Зола	—	—	—	—	10	20	—	—	—
Опилки	10	20	—	—	—	—	15	10	5
Лигнин	—	—	10	20	—	—	5	10	15

Таблица 4

Химический состав глинистой смеси

Table 4

Chemical composition of clay mixture

Проба	Содержание оксидов, масс. %								ППП, %
	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	
1	5,92	1,53	56,31	0,26	2,66	18,49	1,99	2,51	10,34

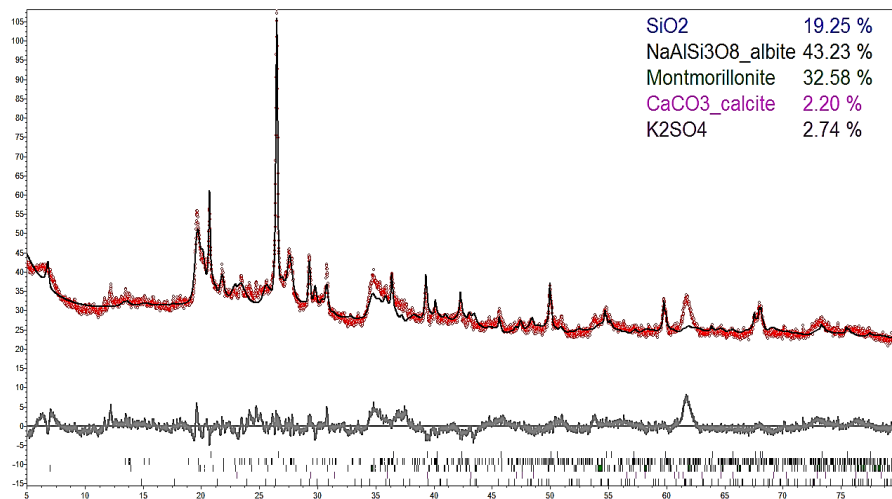


Рис. 4. Рентгенограмма образца в программе TOPAS 3

Fig. 4. XRD patterns for the sample in TOPAS 3 program

Анализ химического состава золы-уноса проводился с использованием стандартных методов, разработанных для работы с данным материалом (табл. 6).

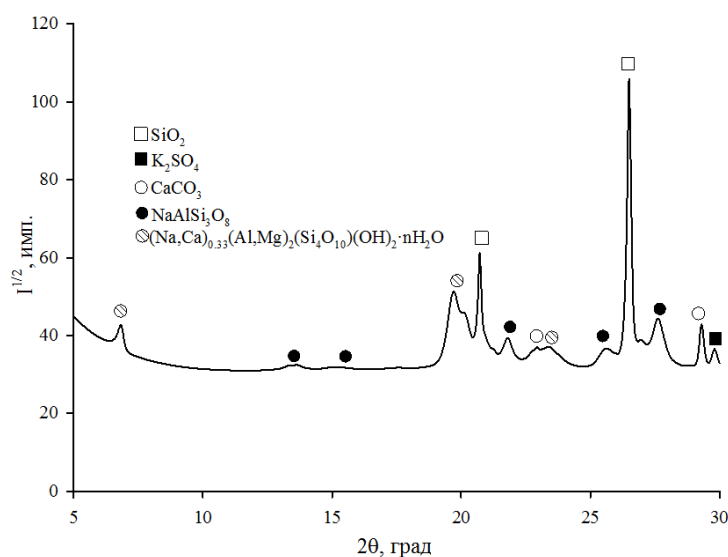


Рис. 5. Фрагмент рентгенограммы образца с отмеченными пиками известных соединений
Fig. 5. XRD patterns for the sample with marked peaks of known compounds

Таблица 5

Содержание основных компонентов в образце

Table 5

Oxide component content in the sample

Минерал	Химическая формула	Содержание, масс. %
Кварц	SiO_2	$19,250 \pm 2,266$
Монтмориллонит	$(\text{Na,Ca})_{0,33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$32,581 \pm 3,844$
Альбит	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	$43,232 \pm 6,642$
Кальцит	CaCO_3	$2,201 \pm 0,286$
Арканит	K_2SO_4	$2,736 \pm 0,421$

Таблица 6

Химический состав золы-уноса Абаканской ТЭЦ

Table 6

Chemical composition of fly-ash from Abakan TPP

Содержание оксидов, масс. %	Вещество	Проба			
		1	2	3	3
	Fe_2O_3	12,46	11,76	9,45	9,63
	Na_2O	0,45	0,39	0,44	0,30
	SiO_2	31,42	36,24	41,44	35,24
	MnO	0,30	0,17	0,16	0,30
	TiO_2	0,17	0,41	0,40	0,48
	K_2O	0,16	0,21	0,26	0,14

Окончание табл. 6
End of table 6

Вещество		Проба				
		1	2	3	3	
Содержание оксидов, масс. %	Al ₂ O ₃	6,22	7,16	6,64	9,47	
	SO ₃	2,48	2,56	3,36	2,08	
	MgO	8,05	7,23	6,85	8,34	
	FeO	–	0,04	0,68	3,16	
	CaO	своб.	8,23	6,91	8,23	7,00
		общ.	37,38	30,98	37,38	32,21
ППП, %		2,05	0,54	2,57	0,58	

Образцы изготавливались методом полусухого прессования при давлении, не превышающем 15 МПа. Исходное сырье предварительно высушивалось, измельчалось и просеивалось через сито, после чего компоненты смешивались до образования однородной массы, которую увлажняли до достижения формовочной влажности не более 20 %. Готовые образцы подвергались сушке при комнатной температуре и обжигались в лабораторной печи. Нагрев изделий продолжался 90 мин до температуры 900 °С, после чего обжиг проводился еще в течение 60 мин. По завершении процесса образцы остывали в печи до комнатной температуры.

Физические и механические свойства полученных изделий определялись по стандартным методикам.

Результаты

По внешнему виду и качественным характеристикам полученные керамические изделия соответствуют удовлетворительным требованиям. При исследовании образцов цилиндрической формы было установлено, что образцы, включающие опилки и лигнин, обладают насыщенным шоколадно-коричневым цветом. Однако образцы с опилками имеют более рыхлую структуру по сравнению с образцами, содержащими лигнин (рис. 6). Гранулометрический состав лигнина позволил получить образцы с равномерной среднепористой макроструктурой.

В свою очередь, образцы с добавлением золы характеризуются коричнево-оранжевым оттенком и более плотной структурой по сравнению с остальными образцами.

Для составов Г⁹⁰Оп¹⁰ и Г⁸⁰Оп²⁰ после обжига характерно снижение плотности, а также рыхлая структура образца и увеличение огневой усадки. Это свидетельствует о том, что с увеличением добавки древесных опилок увеличивается пористость изделия. При этом характер пористости является анизотропным со значительным разбросом диаметра пор, что в некоторых случаях привело к расслоению образца вдоль основных пустот, что безусловно говорит об эффективном применении древесных опилок лишь при изготовлении крупноформатных сплошных изделий.

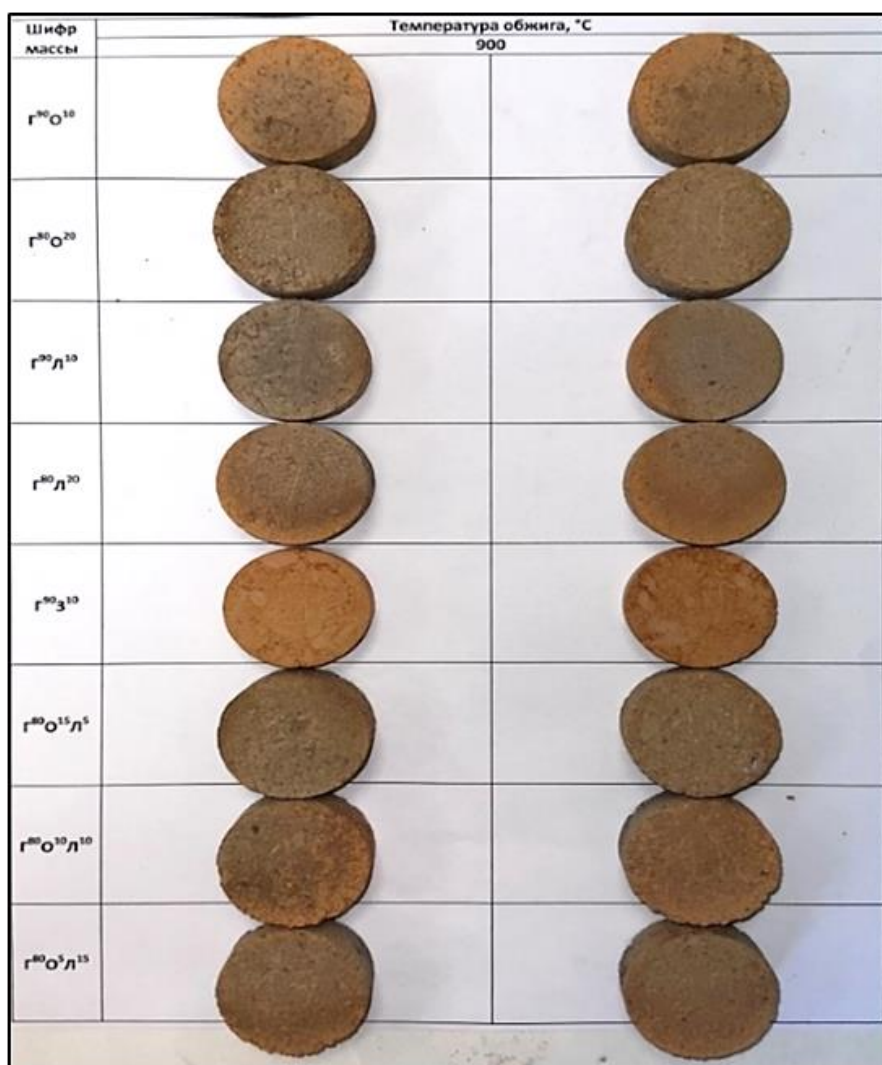


Рис. 6. Внешний вид керамических изделий после обжига
Fig. 6. Ceramic products after firing

Для составов $\Gamma^{90}Z^{10}$ и $\Gamma^{80}Z^{20}$ после обжига характерна плотная структура, снижение огневой усадки и незначительное снижение плотности. Это свидетельствует, что зола-унос в процессе обжига выгорает незначительно. Возможно применение золы-уноса при производстве эффективной керамики в качестве комплексной отошающей добавки, поскольку она хорошо снижает огневую усадку конечного изделия.

На рис. 7 приведены значения средней плотности полученных керамических изделий.

На рис. 8 приведены значения теплопроводности и огневой усадки полученных керамических изделий. Значение теплопроводности определялось прибором ИТП-МГ4 по ГОСТ 7076–99.

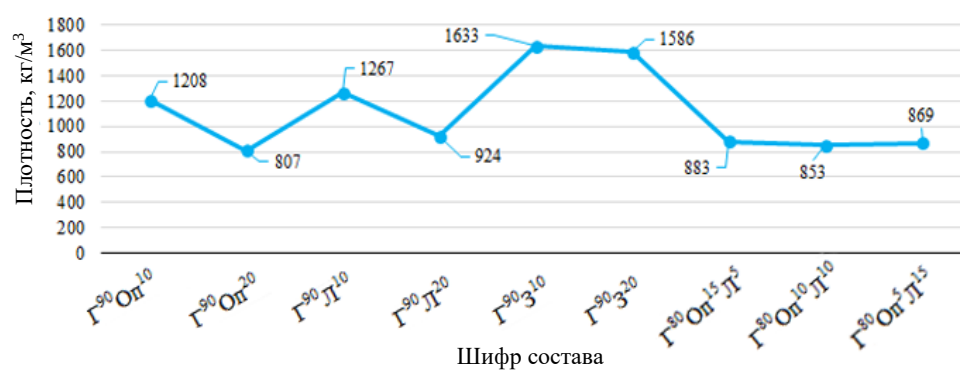


Рис. 7. Средняя плотность полученных керамических изделий

Fig. 7. Average density of ceramic products

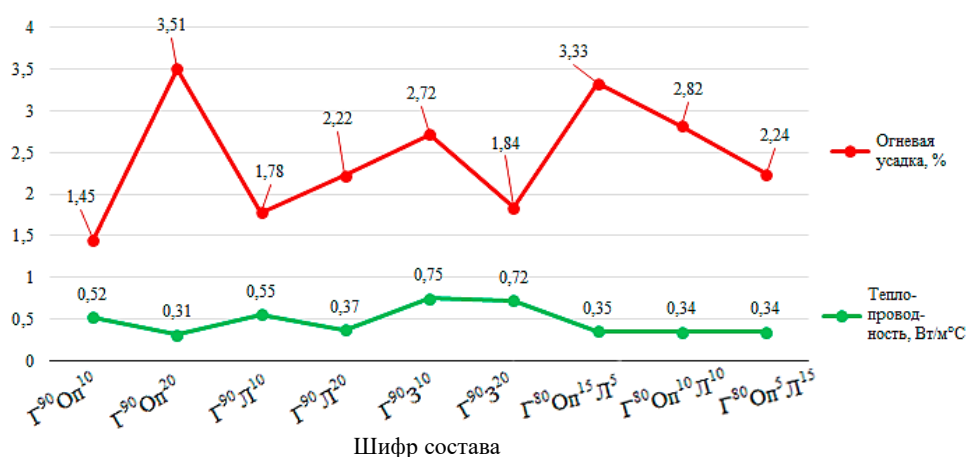


Рис. 8. Теплопроводность и огневая усадка полученных керамических изделий

Fig. 8. Thermal conductivity and fire shrinkage of ceramic products

Усадка керамики при сушке и обжиге существенно влияет на свойства конечных изделий.

Лигнин в составах $\Gamma^{80}\text{Оп}^{15}\text{Л}^5$, $\Gamma^{80}\text{Оп}^{10}\text{Л}^{10}$ и $\Gamma^{80}\text{Оп}^{5}\text{Л}^{15}$ выполняет роль комплексной выгорающей добавки, снижая огневую усадку, формируя при этом относительно равномерную пористость. Древесные опилки, используемые в качестве армирующего компонента, способствуют снижению деформаций сырьевой массы во время сушки. Однако при обжиге, особенно при наличии крупных частиц опилок, деформации, вызванные огневой усадкой, увеличиваются. Это подтверждается результатами экспериментов с составами $\Gamma^{90}\text{Оп}^{10}$ и $\Gamma^{80}\text{Оп}^{20}$. Полученные данные согласуются с выводами авторов [21].

На рис. 9 приведены значения прочности при сжатии полученных керамических изделий.

Результаты испытаний на прочность при сжатии полностью коррелируются с общей динамикой изменения свойств при изменении состава и содержа-

ния выгорающих добавок. Наибольшая прочность при сжатии, как и наибольшая плотность, обеспечивается у составов с добавкой золы-уноса. Керамический черепок характеризуется плотной, хорошо закристаллизованной структурой. Полученные результаты с зольными выгорающими добавками согласуются с данными авторов [22].

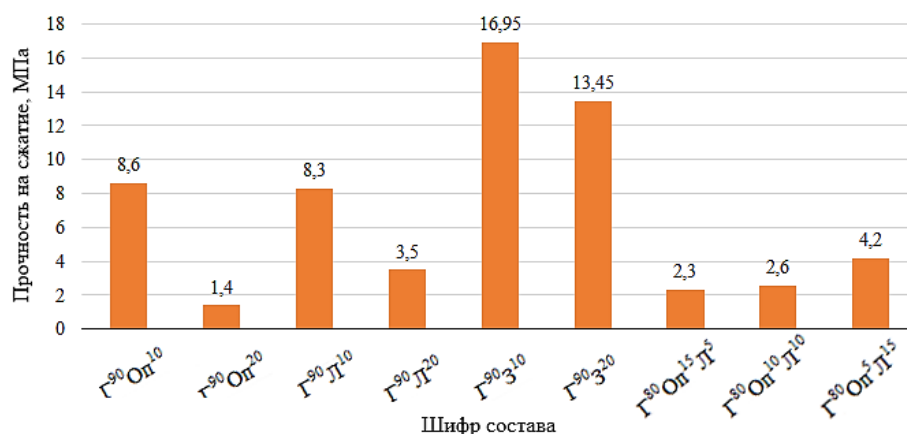


Рис. 9. Прочность на сжатие полученных керамических изделий
Fig. 9. Compressive strength of ceramic products

Применение комплексных добавок, содержащих лигнин и опилки, а также монодобавок лигнина и опилок приводит к снижению прочности по сравнению с добавкой золы-уноса. Как было описано выше, структура таких образцов более рыхлая, с анизотропной пористостью. Наиболее эффективными среди рассмотренных составов являются составы с монодобавкой лигнина или опилок в объеме 10 %, лигнина в объеме 20 %, а также комплексная добавка состава 5 + 15 %, опилки и лигнин соответственно.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение золы-уноса Абаканской ТЭЦ в качестве выгорающей добавки является неэффективным, поскольку плотность керамического черепка снижается незначительно. Золу-унос рекомендуется применять в качестве комплексной отошающей добавки, т. к. она снижает огневую усадку изделия.
2. Использование лигнина в качестве комплексной выгорающей добавки позволило достичь наилучших показателей. Применение лигнина приводит к снижению коэффициента теплопроводности и дает возможность получить керамику повышенной эффективности со средней плотностью до 1000 кг/м³.
3. Содержание комплексной добавки лигнина с опилками не должно превышать 20 % от общей керамической массы.
4. Применение лигнина в качестве выгорающей добавки не приводит к разрыхлению структуры керамического черепка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аниканова Л.А. Особенности применения вторичного ангидритового сырья для производства керамических материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 148–156. EDN: NELLGY
2. Вакалова Т.В., Сергеев Н.П., Толегенов Д.Т., Толегенова Д.Ж., Митина Н.А. Перспективы использования красного шлама для получения высокопрочной строительной керамики // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 171–184. EDN: PUJLFN
3. Singh D., et al. A comprehensive review on valorisation of octal by-product as supplementary admixtures in the production of fired and unfired bricks // Construction and Building Materials. 2023. V. 408. P. 133641. DOI: 10.1016/2023.133641
4. Завадский В.Ф. Лигноминеральные строительные материалы и изделия. Новосибирск : НГАСУ, 2004. 180 с.
5. Никифоров Ю.Е., Селиванов В.М. Гидролизный лигнин как сырье для производства теплоизоляционных материалов // Строительные материалы и изделия из местного сырья Восточной Сибири. Вып. 1. Красноярск : КПИ, 1970. С. 43–45.
6. Шибаева Г.Н., Ибе Е.Е. Отделочные и изоляционные строительные материалы на основе местного сырья РХ. Абакан : Хакаское книжное изд-во, 2016. 100 с.
7. Молоков В.С., Балабанов В.Б. Исследование влияния добавок гидролизного лигнина на физико-механические свойства асфальтобетонных смесей // Инновации и инвестиции. 2024. № 3. С. 569–572. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65601662> (дата обращения: 09.12.2024).
8. Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 1 (391). С. 172–185. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-172-185
9. Береговой В.А., Егунов Д.А., Сорокин Д.С. Строительные материалы и вяжущие вещества на основе гидролизного лигнина // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 3 (32). С. 75–79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30488641> (дата обращения: 03.01.2025).
10. Волочко А.Т., Азаркова Е.А., Хорт Н.А., Манак П.И. Исследование влияния высококалорийных и низкокалорийных выгорающих добавок на характеристики поризованной керамики // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2020. № 16. С. 47–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-vysokokaloriynyh-i-nizkokaloriynyh-vygorayuschih-dobavok-na-harakteristiki-porizovannoy-keramiki> (дата обращения: 09.12.2024).
11. Кара-сал Б.К., Монгуш Д.С., Хойлаарак З.К. Влияние выгорающей добавки на свойства керамических изделий // Техника и технология. 2012. № 4. С. 29–33.
12. Мавлюбердинов А.Р. К вопросу изучения теплопроводности керамических пористо-пустотелых материалов // Известия КазГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 273–277. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-izucheniya-teploprovodnosti-keramicheskikh-poristo-pustotelyh-materialov> (дата обращения: 05.12.2024).
13. Дороганова О.В., Мирошниченко Н.А., Свергузова С.В., Дороганова Е.В. Использование отработанного сорбционного материала в качестве выгорающей добавки к керамическим смесям // Экономика строительства и природопользования. 2019. № 2 (71). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-otrabotannogo-sorbtsionnogo-materiala-v-kachestve-vygorayuschey-dobavki-k-keramicheskim-smesyam> (дата обращения: 20.11.2024).
14. Гостев Д.В., Крюкова А.А., Измайлов А.М., Абдрахимов В.З. Эколого-экономическая и практическая целесообразность использования зоошлака в производстве стенового материала на основе монтмориллонитовой глины // Уголь. 2023. № 4 (1166). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskaya-i-prakticheskaya-tselesoobraznost-ispolzovanie-zoloshlaka-v-proizvodstve-stenovogo-materiala-na-osnove> (дата обращения: 03.01.2025).
15. Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Применение полимерных и стекольных отходов для получения самоглазующейся облицовочной керамики // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 11. С. 38–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41321615> (дата обращения: 09.12.2024).

16. Макаров Д.В., Мелконян Р.Г., Суворова О.В., Кумарова В.А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // ГИАБ. 2016. № 5. С. 254–281. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-promyshlennyh-othodov-dlya-polucheniya-keramicheskikh-stroitelnykh-materialov> (дата обращения: 09.12.2024).
17. Khomenko O., et al. Thermal conductivity study of different engobed ceramic brick // *Cerâmica*. 2024. V. 70. P. eZAOY1947. DOI: 10.1590/ZAOY1947
18. Dele-Afolabi T.T., et al. Organic waste-derived pore formers for macroporous ceramics fabrication: A review on synthesis, durability properties and potential applications // *Materials Today Sustainability*. 2024. P. 100824.
19. Козлов А.И., Махновецкий С.И. Применение гидролизного лигнина в качестве выгорающей добавки // *Строительные материалы*. 1960. № 12. С. 28–36.
20. Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Селиванов В.М., Логинова Е.В., Королькова Н.Н. Составы и свойства керамических теплоизоляционных строительных материалов из масс низкотемпературного вспенивания на основе глинистого сырья // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 3 (29). С. 35–40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18003754> (дата обращения: 09.12.2024).
21. Ибе Е.Е., Чекалова А.Ю., Шibaева Г.Н. Поризованная керамика на основе гидролизного лигнина // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 7 (79). С. 311–319. URL: [item.asp?id=46459820](https://elibrary.ru/item.asp?id=46459820). EDN: FCWPCN
22. Скрипникова Н.К., Григорьевская Д.К., Семеновых М.А. Исследование влияния зольных микросфер на свойства керамических изделий // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. Т. 22. № 2. С. 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-112-119

REFERENCES

1. Anikanova L.A. Acid Fluoride in Ceramic Material Production. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (2): 148–156. DOI:10.31675/1607-1859-2024-26-2-148-156. EDN: NELLGY (In Russian)
2. Vakalova T.V., Sergeev N.P., Tolegenov D.T., Tolegenova D.Zh., Mitina N.A. Red Mud in High-Strength Ceramics Production. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (2): 171–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-171-184. EDN: PUJLFN (In Russian)
3. Singh D., et al. A Comprehensive Review on Valorisation of Octal By-Product as Supplementary Admixtures in the Production of Fired and Unfired Bricks. *Construction and Building Materials*. 2023; 408: 133641.
4. Zavadskii V.F. Lignomineral Building Materials and Products. Novosibirsk: NGASU, 2004. 180 p. (In Russian)
5. Nikiforov Yu.E., Selivanov V.M. Hydrolytic Lignin as Raw Material for the Production of Thermal Insulation Materials. *Stroitel'nye materialy i izdeliya iz mestnogo syr'ya Vostochnoi Sibiri*. Krasnoyarsk, 1970; (1): 43–45. (In Russian)
6. Shibaeva G.N., Ibe E.E. Finishing and Insulating Materials Based on Local Raw Materials of the Republic of Khakassia. Abakan, 2016. 100 p. (In Russian)
7. Molokov V.S., Balabanov V.B. Influence of Hydrolytic Lignin Additives on Physical and Mechanical Properties of Asphalt Concrete Mixes. *Innovatsii i investitsii*. 2024; (3): 569–572. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65601662> (accessed December 9, 2024). (In Russian)
8. Lyubov V.K., Tsyornyatov I.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels. *Lesnoy Zhurnal. Russian Forestry Journal*. 2023; 1 (391): 172–185. Available: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185> (accessed December 9, 2024). (In Russian)
9. Beregovoi V.A., Egunov D.A., Sorokin D.S. Construction Materials and Bindings Based on Hydrolytic Lignin. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2017; 3 (32): 75–79. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30488641> (accessed January 3, 2025). (In Russian)
10. Volochko A.T., Azarkova E.A., Khort N.A., Manak P.I. Effect of High- and Low-Calorie Burn-Out Additives on Porous Ceramics Properties. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2020; 16: 47–51. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-promyshlennyh-othodov-dlya-polucheniya-keramicheskikh-stroitelnykh-materialov>

- leninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-vysokokaloriynyh-i-nizkokaloriynyh-vygorayuschi-dobavok-na-harakteristiki-porizovannoy-keramiki (accessed December 9, 2024). (In Russian)
11. Kara-sal B.K., Mongush D.S., Khoilaarak Z.K. Influence of Burnout Additive on Properties of Ceramic Products. *Tekhnika i tekhnologiya*. 2012; (4): 29–33. (In Russian)
 12. Mavliuberdinov A.R. On Thermal Conductivity of Ceramic Hollow-Porous Materials. *Izvestiya KazGASU*. 2014; 4 (30): 273–277. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-izucheniya-teploprovodnosti-keramicheskikh-poristo-pustotelykh-materialov> (accessed December 5, 2024). (In Russian)
 13. Doroganova O.V., Miroshnihenko N.A., Sverguzova C.B., Doroganova E.V. Use of Waste Sorption Material as a Burnout Additive to Ceramic Mixtures. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2019; 2 (71). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-otrabotannogo-sorbtsionnogo-materiala-v-kachestve-vygorayushey-dobavki-k-keramicheskim-smesyam> (accessed November 20, 2024). (In Russian)
 14. Gostev D.V., Kryukova A.A., Izmailov A.M., Abdrakhimov V.Z. Ecological, Economic and Practical Feasibility of Using Ash Slag in Wall Material Production based on Montmorillonite Clay. *Ugol'*. 2023; 4 (1166). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskaya-i-prakticheskaya-tselesoobraznost-ispolzovanie-zoloshlaka-v-proizvodstve-stenovogo-materiala-na-osnove> (accessed January 3, 2025). (In Russian)
 15. Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S., Selivanov O.G. Polymer and Glass Wastes in Production of Self-Glazing Facing Ceramics. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019; 23 (11): 38–42. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41321615> (accessed December 9, 2024). (In Russian)
 16. Makarov D.V., Melkonyan R.G., Suvorova O.V., Kumarova V.A. Prospects for Using Industrial Waste in Production of Ceramic Building Materials. *GIAB*. 2016; 5: 254–281. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-promyshlennykh-othodov-dlya-polucheniya-keramicheskikh-stroitelnykh-materialov> (accessed December 9, 2024). (In Russian)
 17. Khomenko O., et al. Thermal Conductivity of Different Engobed Ceramic Brick. *Cerâmica*. 2024; 70: eZAOY1947.
 18. Dele-Afolabi T.T., et al. Organic Waste-Derived Pore Formers for Macroporous Ceramics Fabrication: A Review on Synthesis, Durability Properties and Potential Applications. *Materials Today Sustainability*. 2024; 100824.
 19. Kozlov A.I., Makhnovetskii S.I. Application of Hydrolytic Lignin as a Burnout Additive. *Stroitel'nye materialy*. 1960; 12. (In Russian)
 20. Selivanov Yu.V., Shil'tsina A.D., Selivanov V.M., Loginova E.V., Korol'kova N.N. Composition and Properties of Ceramic Thermal Insulation Materials Made of Low-Temperature Foaming Masses Based on Clay Raw Materials. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 3 (29): 35–40. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18003754> (accessed December 9, 2024). (In Russian)
 21. Ibe E.E., Chekalova A.Yu., Shibaeva G.N. Porous Ceramics Based on Hydrolyzed Lignin. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2021; 7 (79): 311–319. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46459820> (accessed December 9, 2024). (In Russian)
 22. Skripnikova N.K., Grigorevskaya D.K., Semenovskiy M.A. The Influence of Ash Microspheres on Ceramic Properties. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (2): 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-112-119 (In Russian)

Сведения об авторах

Ибе Екатерина Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент, Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета, 655017, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27, katerina.ibe@mail.ru

Миронов Святослав Евгеньевич, магистрант, Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета, 655017, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27, miks0070@mail.ru

Шибаева Галина Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета, 655017, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27, shibaevagn@mail.ru

Authors Details

Ekaterina E. Ibe, PhD, A/Professor, Khakassian Technical Institute, SibFU Affiliate, 27, Shchetinkin Str., 655017, Russia, Abakan, katerina.ibe@mail.ru

Svyatoslav E. Mironov, Graduate Student, Khakassian Technical Institute, SibFU Affiliate, 27, Shchetinkin Str., 655017, Russia, Abakan, miks0070@mail.ru

Galina N. Shibaeva, PhD, A/Professor, Khakassian Technical Institute, SibFU Affiliate, 27, Shchetinkin Str., 655017, Russia, Abakan, shibaevagn@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.01.2025
Одобрена после рецензирования 16.04.2025
Принята к публикации 21.04.2025

Submitted for publication 12.01.2025
Approved after review 16.04.2025
Accepted for publication 21.04.2025

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 172–188.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 172–188.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.003

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-172-188

EDN: QLZNNS

ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Джавед Сират, Александр Алексеевич Руденко

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оценки влияния организационно-производственных структур на эффективность реализации строительных проектов и их оптимизация с учетом специфики строительных процессов.

Цель исследования заключается в определении степени влияния различных типов организационно-производственных структур на успешность выполнения строительных проектов, а также в разработке рекомендаций к их оптимизации для повышения общей эффективности. В исследовании анализируются факторы, определяющие успешность строительных работ в контексте организации процессов, распределения обязанностей и уровня квалификации специалистов.

Методы исследования. Для сбора данных был использован метод анкетирования с применением шкалы Лайкерта. Для обработки данных применялись методы множественного регрессионного анализа, корреляционного анализа и теста Фридмана.

Результаты исследования позволили выявить, систематизировать и ранжировать факторы, оказывающие влияние на эффективность реализации строительных проектов. Установлено, что квалификация специалистов и оптимизация организационно-производственных структур оказывают решающее влияние на достижение целей проекта. На основе полученных данных сделан вывод о необходимости внедрения систем развития персонала и применения принципов управления по целям для повышения эффективности реализации строительных проектов.

Ключевые слова: организационно-производственные структуры, строительные проекты, эффективность реализации, оптимизация структуры, факторы влияния, успешность проекта, управление ресурсами

Для цитирования: Джавед Сират, Руденко А.А. Оптимизация организационных структур на эффективность реализации проектов строительства технически сложных объектов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 172–188. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-172-188. EDN: QLZNNS

ORIGINAL ARTICLE

OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES FOR EFFICIENT IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTION PROJECTS OF COMPLEX ENGINEERING OBJECTS

Jawed Serat, Aleksandr A. Rudenko

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. The article evaluates the influence of organizational operating structures on the efficiency of construction projects and their optimization taking into account the specifics of construction processes.

Purpose: Determination of the influence of various types of organizational operating structures on construction project implementation and development of approaches to their optimization.

Methodology/approach: The analysis of factors that determine the construction work during organizing processes and distributing responsibilities. For the data collection, a questionnaire method is used using the Likert scale. The multiple regression analysis, correlation analysis and the Friedman test are used for the data processing.

Research findings: Factors influencing the efficiency of construction projects are identified, systematized and ranked. It is shown that qualifications of specialists and optimization of organizational and production structures have a key impact on achieving the project goals.

Value: The implementation of personnel development systems is required as well as the application of management principles by objectives to improve the efficiency of construction projects.

Keywords: organizational operating structure, construction projects, project implementation, efficiency, structural optimization, influencing factors, project success, resource management

For citation: Jawed Serat, Rudenko A.A. Optimization of Organizational Structures for Efficient Implementation of Construction Projects of Complex Engineering Objects. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 172–188. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-172-188. EDN: QLZNNS

Введение

Организационно-производственные структуры в области строительства являются ключевым элементом для координации и управления различными аспектами строительного процесса.

Их влияние на успешную реализацию строительных проектов представляет собой важный фактор, определяющий эффективность выполнения работ.

Эффективность управления ресурсами, распределение обязанностей и процессы принятия решений в ходе реализации строительных проектов во многом зависят от выбранной организационно-производственной структуры [1]. Многие строительные компании применяют различные модели организационных структур для оптимизации своей деятельности.

С увеличением сложности и разнообразия факторов, влияющих на успешное завершение строительных проектов, возникает необходимость в более глубоком анализе и понимании организационно-производственных структур. Это особенно важно для эффективной реализации проектов, где правильный выбор организационно-производственных структур играет решающую роль в строительной отрасли [2]. Проекты, иногда называемые «программами», представляют собой объекты особого внимания и требуют глубокого анализа. Исследование эффективности различных организационных подходов в практической реализации таких проектов имеет большое значение для успешного завершения каждого проекта [3].

Анализ влияния организационно-производственных структур на реализацию строительных проектов является критически важным для их оптимизации и повышения эффективности. Понимание того, как различные организационно-производственные структуры влияют на процесс выполнения строительных проектов, позволит разработать оптимальные стратегии управления строительным производством и рекомендации для успешного завершения каждого проекта.

Организационно-производственные структуры являются важным элементом управления, направленным на достижение заранее определенных целей [4]. Руководство должно разработать такую структуру, которая наилучшим образом соответствует корпоративным целям и обеспечивает четкое распределение обязанностей и полномочий внутри организации.

Эффективные организационно-производственные структуры способствуют координации и контролю процессов внутри организации, минимизируя такие негативные явления, как неразбериха, нерешительность и дублирование усилий. Также отмечается, что для достижения эффективности организационно-производственные структуры должны обладать рядом характеристик, включая: гибкость для адаптации к изменяющимся условиям строительного проекта; ясное распределение обязанностей и полномочий между участниками строительного проекта; эффективную систему коммуникации и координации; мотивацию персонала; способность оперативно реагировать на возникающие проблемы и эффективно управлять затратами на строительство; совместимость организационно-производственных структур с особенностями конкретного строительного проекта и его целями; обладать определенным уровнем централизации или децентрализации управления в строительной компании

Эти факторы играют важную роль в оценке влияния организационно-производственных структур на эффективную реализацию проектов, способствуя успешному выполнению строительных работ [5].

Для реализации строительных проектов с высокой степенью сложности необходимо тщательно оценить влияние организационно-производственных структур на ход выполнения проектов.

Команда управления строительным производством должна учитывать разнообразные особенности проектов и переменчивость строительного рынка при сохранении высокой производительности [6].

Для организации контроля за различными видами строительных работ применяются определенные организационно-производственные структуры.

Рациональный выбор компании способствует повышению эффективности и результативности группы, обеспечивающей реализацию проекта, что, в свою очередь, способствует достижению максимального эффекта. В рамках данного исследования представляется необходимым провести комплексный анализ организационно-производственных структур с целью выявления влияния различных факторов, определяющих структуру, на эффективность реализации строительных проектов. В том числе:

а) выявить основные принципы применения конкретных организационно-производственных структур в процессе строительных проектов, применяя широко известные теории конструкций для подтверждения их обоснованности;

б) осуществить анализ взаимосвязи между особенностями строительного объекта и характеристиками его организационно-производственных структур;

в) рассмотреть принципы и методы теории организаций для оценки влияния различных организационно-производственных структур на достижение целей проекта в строительстве;

г) разработать инструкцию для руководителя проекта, направленную на формирование и оптимизацию организационно-производственных структур с учетом специфики различных проектов. Анализ научных источников [7–20] позволил выявить следующие сложности.

Реализация строительных проектов требует высокой степени координации и согласованности действий, что, в частности, зависит от эффективности организационно-производственных структур подрядных компаний [7]. Одной из ключевых причин сбоев в реализации проектов, особенно в регионах с особыми условиями, является несформированность или низкая адаптивность организационно-производственных структур, что может привести к нарушению взаимодействия между подрядными организациями, проектировщиками и заказчиками. Это, в свою очередь, вызывает рост затрат на строительство и отклонения от проектных требований [8].

Эффективные организационно-производственные структуры должны включать четкое распределение функций, обеспечение технологического сопровождения строительства и стабильное взаимодействие между всеми участниками проекта [9]. Исследования также указывают, что одной из причин сбоев в реализации проектов выступает недостаточная квалификация персонала на различных уровнях, а также недостаточная гибкость структуры в условиях изменяющейся строительной среды.

Наличие адекватно сформированной организационно-производственной структуры значительно повышает вероятность успешной реализации проекта, способствует сокращению затрат и обеспечивает своевременное выполнение задач в соответствии с нормативными требованиями [10]. Оценка влияния организационно-производственных структур на эффективность реализации строительных проектов является определяющим фактором достижения положительных результатов.

Организация строительного производства непосредственно влияет на сроки, технологическое соответствие и конечный результат реализации проекта [11].

Исследования показывают, что сложные природные и технические условия значительно затрудняют процесс оценки эффективности выполнения строительных задач и функций. Это особенно актуально для строительства, где структура организаций подрядчиков часто не имеет необходимых операционных инструкций и процедур.

Статистические данные свидетельствуют о том, что организационные структуры ряда строительных компаний не обеспечивают эффективную реализацию строительных работ, т. к. недостаточно акцентируют внимание на четком определении ролей, полномочий и каналов коммуникации.

Это может приводить к неэффективному распределению ресурсов, негативно сказываться на сроках выполнения строительных работ и увеличивать затраты на строительство. Четкое разграничение ответственности и функций внутри компании часто отсутствует, что приводит к конфликтам на всех уровнях проекта и снижает общую эффективность реализации строительных проектов, особенно в сложных условиях.

Неудачи в реализации таких проектов часто связаны с тем, что руководители строительных компаний либо не осознают непредвиденные затраты, возникающие из-за неэффективности организационно-производственных структур, либо не могут эффективно справляться с проблемами, связанными с управлением строительным производством [12].

Анализ, проведенный авторами исследования, показал, что большинство структур сталкивается с увеличением сроков и затрат на строительство, а также с низким качеством выполненных работ.

В строительстве объектов, где требуется высокая координация и тщательное управление на всех этапах, особенно важна правильная организация строительных процессов.

Изучение организационно-производственных структур позволит выявить ключевые факторы, влияющие на успешное завершение проектов в рамках установленных сроков и с требуемым качеством [13].

Настоящее исследование направлено на предоставление специалистам в области управления строительным производством необходимых знаний и методологических подходов для обоснованного принятия решений в процессе оптимизации организационно-производственных структур для повышения производительности труда. В данном исследовании особое внимание уделяется технически сложным объектам, расположенным на территории Афганистана, что позволяет глубже понять специфику их реализации в данной географической и организационной среде.

В настоящей работе основные характеристики и показатели эффективности организационно-производственных структур подвергаются глубокому анализу в контексте ключевых параметров реализации проектов, включая соблюдение установленных сроков завершения, соответствие затратам на строительство, а также соответствие проектным спецификациям.

На основании изученных источников выявлено, что многие методологические подходы предлагают универсальные решения, не всегда эффективные

в условиях разнообразия проектов, поэтому необходима концепция интеграции стратегий, структур и процессов управления для повышения общей эффективности реализации строительных проектов [14].

Такая концепция будет способствовать улучшению следующих показателей: соблюдение сроков, повышение качества работ и оптимизация затрат на строительство. Необходимы дальнейшие исследования для выявления механизмов взаимодействия между организационно-производственными структурами и результативностью проектов, что позволит более эффективно управлять строительными процессами [15].

Строительные компании используют различные организационно-производственные структуры для решения задач, связанных с возрастанием сложности и неопределенности, сопровождающих реализацию строительства.

Организационно-производственные структуры компании могут значительно влиять на ее способность эффективно управлять строительством и достигать поставленных целей. Однако многие компании не осознают необходимости пересмотра своих структур до возникновения серьезных проблем, затрудняющих успешное завершение строительных проектов.

Для успешного выполнения строительных проектов в условиях динамично изменяющейся среды компании должны обладать способностью к быстрой адаптации своей структуры [16].

В строительстве это особенно важно, поскольку различные стадии проектов могут предъявлять разные требования к организационным структурам. Глубокое понимание роли организационно-производственных структур для успешной реализации строительных проектов имеет ключевое значение, поскольку именно структура определяет эффективность использования строительных ресурсов [17].

Тщательный анализ состава строительной команды и иерархии подчиненности имеет критическое значение для достижения успешных результатов, подразумевая, что структура команды должна быть гибкой и способной к адаптации на каждом этапе выполнения проекта с учетом изменяющихся условий и требований в процессе строительства [18].

Основными факторами, способствующими организационным изменениям, являются: интеграция новых технологий, необходимость быстрой адаптации к специфике строительных условий, требования к строгому соблюдению сроков и изменяющиеся ожидания заказчиков [19].

Классификация организационно-производственных структур, применяемых в строительстве, включает функциональные, проектные и матричные модели. Каждая из них оказывает существенное влияние на процессы реализации проектов, обеспечивая гибкость и адаптивность структур к специфике строительных заданий.

Соответственно выбор подходящей организационно-производственной структуры представляет собой один из ключевых факторов повышения эффективности реализации строительных проектов.

Вместе с тем в практике строительного производства нередко наблюдаются противоречия между структурами, ориентированными на снижение затрат, и структурами, способствующими удовлетворению кадровых потребностей

в рамках механистических и органических моделей [20]. В механистической структуре акцент делается на высокую производительность, формализованные процедуры, централизованный контроль и специализацию труда, тогда как органическая структура предполагает децентрализацию, гибкость, самостоятельность нижнего уровня и адаптацию к динамике производственного процесса.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования применен метод экспертных оценок для формирования структуры анализа, а также методы площадной и оценочной выборки для сбора данных. В качестве основного инструмента использовалась стандартизированная анкета, разработанная на основе пятибалльной шкалы Лайкерта. Анкетирование проводилось среди экспертов, вовлеченных в реализацию десяти технически сложных строительных проектов в Афганистане. Всего было распространено 100 анкет, из которых 64 (64 %) были возвращены и использованы для анализа.

Для обработки полученных данных применялись методы множественного регрессионного анализа, а также критерий Фридмана.

Это позволило определить влияние организационных факторов на эффективность реализации строительных проектов.

Выбор региона исследования обусловлен высокой концентрацией строительных объектов, ориентированных на формирование инфраструктуры для освоения строительных ресурсов, требующих применения сложных технических решений. Статистические проверки гипотез выполнялись на уровне значимости 5 %, что обеспечило надежность полученных результатов. В рамках анализа организационных факторов, влияющих на эффективность реализации проектов строительства, были выявлены основные.

Это позволило более точно учесть специфические особенности организационно-производственных структур в строительной отрасли.

К факторам исследования организационно-производственных структур, используемых в спецификациях моделей и анализе данных, относятся:

- уровень контроля (X_1) – определяет количество процессов, находящихся под управлением конкретных руководителей, и их значение для организации строительных работ;
- уровень гибкости (X_2) – отражает способность организационно-производственных структур адаптироваться к изменяющимся условиям на строительной площадке, что критически важно для успешного завершения проектов;
- уровень руководителей и бережливого персонала (X_3) – характеризует взаимодействие между руководством и рабочими, а также их вовлеченность в процесс строительства;
- количество подразделений и отделов (X_4) – влияет на структурированность организации и эффективность координации строительных процессов;
- уровни власти и полномочий, а также коммуникационный поток (X_5) – демонстрируют, как распределение полномочий и информация между участниками проекта способствуют быстрому принятию решений в процессе реализации строительных проектов;

– индексы, ориентированные на подотчетность и технические характеристики (X_6), подчеркивают важность выполнения строительных работ в соответствии с установленными требованиями к отчетности;

– уровень простоты (X_7) – демонстрирует степень ясности организационно-производственных структур для всех участников строительного процесса, что способствует более эффективной реализации проектов.

Факторы исследования $X_1, X_2, \dots, X_7$ представлены в табл. 1 и являются независимыми переменными, влияющими на процессы строительства.

Таблица 1

Статистика факторов, влияющих на эффективность реализации проектов

Table 1

Factors influencing project implementation efficiency

Факторы	Средние значения	Стандартное отклонение	Количество наблюдений
Y	40,51	9,222	100
X_1	13,12	3,110	100
X_2	12,54	3,448	100
X_3	23,38	2,244	100
X_4	12,80	2,665	100
X_5	12,18	4,145	100
X_6	13,70	2,254	100
X_7	13,71	2,702	100

Зависимая переменная Y отражает уровень эффективности реализации проектов и выступает интегральным показателем, обобщающим результаты функционирования организационно-производственных структур в рамках строительного процесса.

В данном исследовании выделяются следующие типы организационно-производственных структур:

ОС₁ – функциональная структура: характеризуется четким разделением обязанностей по функциям (например, проектирование, строительство, управление), что способствует специализации и эффективному выполнению задач;

ОС₂ – продуктовая/продуктная структура: ориентирована на реализацию конкретных проектов или продуктов, обеспечивая гибкость и адаптацию к требованиям каждого проекта;

ОС₃ – матричная структура: сочетает элементы функциональной и проектной структур, что позволяет более эффективно использовать ресурсы и улучшить коммуникацию между командами, работающими над различными проектами.

Анализ данных осуществлялся с использованием программного обеспечения Statistical Package for Social Sciences (SPSS).

Проверка исследовательских гипотез проводилась на уровне значимости 5 % (α). Решение о принятии гипотезы основывается на сравнении p -значения с уровнем значимости: если p -значение превышает α , то нулевая гипотеза H_0 отклоняется в пользу альтернативной гипотезы H_A , и наоборот.

Анализ матрицы корреляции, представленной в табл. 2, не выявил значительных взаимосвязей между независимыми факторами.

Таблица 2

**Корреляционная матрица факторов
организационно-производственных структур**

Table 2

Correlation matrix of organizational structure factors

Факторы		Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
Эффективность	Y	1	0,004	0,116	0,186	0,012	0,08	0,201	0,085
	X ₁	0,004	1	0,381	0,131	0,144	0,153	0,408	0,05
	X ₂	0,116	0,381	1	0,06	0,015	0,101	0,202	0,108
	X ₃	0,186	0,131	0,06	1	0,001	0,042	0,44	0,001
	X ₄	0,012	0,144	0,015	0,001	1	0,06	0,008	0,177
	X ₅	0,08	0,153	0,101	0,042	0,06	1	0,04	0,01
	X ₆	0,201	0,408	0,202	0,44	0,008	0,04	1	0,08
	X ₇	0,085	0,05	0,108	0,001	0,177	0,01	0,08	1
Значимость факторов	Y		0,06	0,001	0	0,274	0,006	0	0
	X ₁	0,06		0	0	0	0	0	0,008
	X ₂	0,001	0		0,004	0,044	0,004	0	0,001
	X ₃	0	0	0,004		0,328	0,141	0	0,328
	X ₄	0,274	0	0,044	0,328		0,071	0,054	0
	X ₅	0,006	0	0,004	0,141	0,071		0,016	0,05
	X ₆	0	0	0	0	0,054	0,016		0,006
	X ₇	0	0,008	0,001	0,328	0	0,05	0,006	
Количество наблюдений	X ₇					100			100

Это свидетельствует о корректности выбора факторов, что позволяет использовать их в регрессионной модели для оценки влияния организационных факторов на эффективность реализации строительных проектов.

Согласно сводным данным модели (табл. 3), коэффициент корреляции составил $R = 0,311$ (31,1 %), а коэффициент детерминации $R^2 = 0,16$ (16 %), что указывает на умеренную степень взаимосвязи между организационными структурами и эффективностью реализации проектов.

Таблица 3

**Сводная характеристика модели оценки влияния факторов
организационно-производственных структур на эффективность
реализации проектов**

Table 3

**Impact of organizational operating structure factors
on project implementation efficiency**

Модель	Коэффициент корреляции R	Коэффициент детерминации R ²	Скорректированный коэффициент детерминации R ^{2'}	Стандартная ошибка
Y	0,311	0,160	0,122	8,513

Тем не менее данная корреляция не достигла высокой статистической значимости. Кроме того, доля объясняемых факторов, включенных в модель регрессии, составила 16 %. Это свидетельствует о возможном неполном влиянии организационно-производственных структур на результативность реализации проектов, т. е. не все аспекты организационно-производственных структур внесли достаточный вклад в улучшение показателей строительных проектов.

Анализ дисперсии, выполненный для оценки влияния различных организационно-производственных структур на эффективность реализации проектов, представлен в табл. 4. Данный анализ позволяет выявить значимые факторы, вносящие наибольший вклад в вариативность результатов, что критически важно для разработки оптимальных организационных решений.

Таблица 4

Анализ дисперсии по типам организационно-производственных структур, используемых в строительстве

Table 4

Analysis of organizational operating structures

Модель	Сумма квадратов	Степени свободы df	Средний квадрат	F	(p -значения)
Y	1843,73	6	311,11	3,446	0
Остаток	13 338,61	145	81,515	–	–
Всего	163 030,45	152	–	–	–

Коэффициенты влияния каждого из факторов, используемых в модели, на эффективность реализации проектов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Регрессионные коэффициенты влияния факторов организационно-производственных структур на эффективность реализации проектов

Table 5

Regression coefficients of influence of organizational operating structures on project implementation efficiency

Факторы	Нестандартизированные коэффициенты	Стандартная ошибка	Стандартизированные коэффициенты	Статистика t	Интерпретация (p -значения)
Y	17,172	4,142	–	4,378	0
X_1	–0,302	0,126	–153	–1,601	0,081
X_2	0,304	0,183	0,168	1,081	0,027
X_3	0,464	0,161	0,176	1,114	0,025
X_4	–0,003	0,103	–0,01	–010	0,873
X_5	0,211	0,142	0,145	1,035	0,031
X_6	0,517	0,206	0,101	1,008	0,035
X_7	0,055	0,103	0,013	0,205	0,650

Эти данные иллюстрируют значимость и направление воздействия отдельных независимых переменных, таких как $X_1, X_2, \dots, X_7$, на интегральный показатель Y . Подобный подход обеспечивает возможность более точной оценки организационных решений и их корректировки в целях повышения эффективности строительства.

Регрессионная модель, основанная на данных табл. 5, может быть представлена следующим образом:

$$Y = 17,172 - 0,302X_1 + 0,304X_2 + 0,464X_3 - 0,003X_4 + 0,211X_5 + 0,517X_6 + 0,055X_7.$$

Для оценки различий в воздействии организационных факторов на реализацию строительных проектов использован тест множественного сравнения. Этот тест позволил выявить группы факторов (квалификация руководителей, уровень гибкости или количество подразделений), демонстрирующие значимые различия в своей корреляции с эффективностью реализации строительных проектов.

Данные табл. 6 являются основой для проведения анализа различий между группами с помощью множественного сравнительного теста.

Таблица 6

Статистические данные для множественного сравнительного анализа влияния организационно-производственных структур

Table 6

Statistical data for multiple comparative analysis of the influence of organizational structures

Организационные структуры	Количество наблюдений N	Среднее значение	Стандартное отклонение	Мин	Макс
Функциональная	100	13,29	3,135	4	23
Проектная	100	13,21	2,403	3	20
Матричная	100	12,88	2,653	3	20

В исследовании влияния различных организационно-производственных структур на эффективность реализации строительных проектов применен тест Фридмана для оценки различий между медианами результатов в условиях различных организационно-производственных структур. Результаты позволили выявить, что существуют статистически значимые различия в эффективности реализации проектов при использовании матричной, проектной и функциональной организационно-производственных структур (табл. 7).

Полученные статистические данные множественного сравнения представлены в табл. 8. Эти данные показывают результаты анализа различий между группами факторов, влияющих на эффективность реализации проектов при использовании различных организационно-производственных структур.

Статистические показатели, такие как средние значения, стандартные отклонения и p -значения, позволяют оценить степень значимости различий и подтвердить или опровергнуть выдвинутые гипотезы.

Таблица 7

**Рейтинг Фридмана средней эффективности
организационно-производственных структур**

Table 7

Friedman's rating of average organizational structure effectiveness

Организационные структуры	Средний рейтинг	Уровень эффективности
Функциональная	1,84	Высокий
Матричная	1,02	Оптимальный
Проектная	1,01	Допустимый

Таблица 8

Результаты статистики множественного сравнения

Table 8

Multiple comparison statistics

Количество наблюдений (N)	100
Статистические данные множественного сравнения	0,461
Степени свободы	1,02
Асимптотическая значимость	1,84

В результате анализа данных табл. 7 можно утверждать следующее:

1. Функциональная структура демонстрирует высокий уровень эффективности с рейтингом 1,84.
 2. Матричная структура имеет оптимальный уровень эффективности с рейтингом 1,02.
 3. Проектная структура имеет критически низкий рейтинг 1,01, что указывает на ее низкую эффективность по сравнению с другими типами структур.
- Таким образом, наиболее эффективной из рассмотренных вариантов является функциональная структура, а проектная – наименее эффективной.

Результаты исследования

Проведенный в настоящем исследовании анализ показал, что разработанная регрессионная модель, описывающая взаимосвязь ключевых факторов в организационной структуре с коэффициентом влияния, позволяет точно прогнозировать воздействие этих факторов на эффективность реализации проектов. Комплексный подход к выбору структуры и управлению производственными процессами на всех этапах строительства оказывается важным для оптимизации этих процессов.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ было установлено, что исследованные организационные компоненты имеют значительное влияние на выполнение строительных проектов, что подтверждается данными, представленными в табл. 4. Факторы, связанные с организационной структурой, а также их влияние на эффективную реализацию проектов представлены в табл. 9 и ранжированы в соответствии с результатами, приведенными в табл. 5.

Таблица 9

**Ранжирование факторов, влияющих
на эффективность реализации проектов**

Table 9

Factors influencing the project implementation efficiency

Факторы	Е-значение	Р-значение	Ранг
X_1	1,601	0,081	4
X_2	1,081	0,027	2
X_3	1,114	0,025	1
X_4	0,011	0,873	5
X_5	1,035	0,031	3
X_6	1,008	0,036	4
X_7	0,205	0,650	5

В результате анализа выявлено, что факторы X_3 , X_2 , X_5 и X_6 оказывают статистически значимое влияние, в то время как X_1 , X_4 и X_7 не продемонстрировали значимости.

Заключение

В рамках настоящего исследования проведена комплексная оценка влияния организационно-производственных структур на эффективность реализации строительных проектов. Разработанные модели позволили осуществить обоснованный выбор и последующую оптимизацию структур, способных повысить результативность строительного производства, особенно при реализации технически сложных объектов, в том числе в условиях строительства в Афганистане. На основании полученных результатов сформулированы следующие положения:

1. Эффективность реализации строительных проектов непосредственно зависит от типа организационно-производственной структуры, а также от таких факторов, как уровень контроля, гибкость, количество подразделений, автономия участников и степень прозрачности организационных процессов.

В ходе анализа установлено, что именно адаптивность организационной структуры к изменениям в ходе строительства оказывает наиболее значимое влияние на достижение проектных целей.

2. Оптимизация организационно-производственных структур на основе анализа эмпирических данных и экспертных оценок обеспечивает четкое распределение функций, согласованное взаимодействие между участниками проекта и эффективное выполнение строительных задач.

Модели оценки позволяют учитывать специфику каждого проекта и выбирать такие формы организации, которые обеспечивают устойчивое функционирование при переменных внешних и внутренних условиях.

3. Внедрение предложенных моделей в практику управления строительным производством позволяет формировать гибкие и устойчивые структуры с четко определенными зонами ответственности и информационными потоками, что способствует своевременному принятию решений и снижению вероятности сбоев.

4. Значимую роль в повышении эффективности реализации проектов играет развитие системы подготовки кадров и передачи знаний между уровнями организации. Это обеспечивает сохранение профессионального потенциала и устойчивость структуры к кадровым рискам.

5. Применение методов оценки рисков на основе разработанных моделей позволило выявить уязвимые участки в организационной конфигурации и предложить меры по их устранению еще на этапе планирования проекта, что повышает общую надежность строительного процесса.

6. Интеграция современных цифровых и строительных технологий в организационно-производственные процессы усиливает эффект оптимизации структур и позволяет достичь максимального результата за счет ускорения обмена информацией, автоматизации контроля и повышения точности принятия решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борисюк Н.К., Смотрина О.С. К вопросу функционирования предприятия в нестабильной внешней среде // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 2. С. 24–30. DOI: 10.25198/2077-7175-2022-2-24. EDN: XLJDGS
2. Дьячкова О.Н., Михайлов А.Е., Якунина Г.В. Опыт оценки привлекательности районных парков Санкт-Петербурга // Социология города. 2022. № 3. С. 49–63. DOI: 10.35211/19943520_2022_3_49. EDN: TYSKCT
3. Зеленцов Л.Б. Реализация строительных проектов изменяемого функционального назначения // Строительное производство. 2021. № 2. С. 26–32. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_26. EDN: BZKXLZ
4. Зеленцов Л.Б., Цапко К.А., Беликова И.Ф., Пирко Д.В. Современные методы оценки организационно-технологической надежности инвестиционно-строительного комплекса // Инженерный вестник Дона. 2020. № 9. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/p9y2020/6602> (дата обращения: 28.04.2023).
5. Лебедев В.М. Организационно-технологическая надежность управляющих систем строительства // Вестник МГСУ. 2008. № 4. С. 191–194. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionnotekhnologicheskaya-nadezhnostupravlyayuschih-sistem-stroitelstva-1> (дата обращения: 28.04.2023).
6. Родин Д.А. Учет факторов неопределенности и риска при оценке инвестиционных проектов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2022. № 3–4. С. 19–25. EDN: TJRDTU
7. Сафарян Г.Б. Критический анализ обобщенной модели строительной системы // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 4. С. 41–47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN: PFGTCK
8. Цона Н.В., Халилов А.Э. Ресурсное обеспечение инвестиционно-строительных проектов // Экономика строительства и природопользования. 2022. № 1–2 (82–83). С. 23–30. EDN: KOSHPG
9. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymer concrete with improved characteristics // Sustainability. 2021. № 13. 13607. DOI: 10.3390/su132413607
10. Chen Yi., Zhu D., Tian Z., Guo Q. Factors influencing construction time performance of prefabricated house building: A multi-case study // Habitat International. 2023. V. 131. DOI: 10.1016/j.habitatint.2022.102731

11. *Díaz-López C., Serrano-Jiménez A., Verichev K., Barrios-Padura A.* Passive cooling strategies to optimise sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review // *Building and Environment*. 2022. V. 221. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109297
12. *Falah Al-Rubaie.* The identity of the economic system in Iraq between the rentier state and the developmental state // *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021. V. 484 (2019). P. 12–38.
13. *Huang X.* A decision-making model for optimizing project performance in construction // *International Journal of Project Management*. 2018. DOI: 10.1016/j.ijproman.2017.08.005
14. *Krichevsky M., Martynova J., Dmitrieva S.* Use of Neural Networks to Assess Competitiveness of Organizations // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT-2019*. 2019. P. 72–82. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_8
15. *O'Neill C., Gopaldasani V., Coman R.* Factors that influence the effective use of safe work method statements for high-risk construction work in Australia – A literature review // *Safety Science*. 2022. V. 147. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105628
16. *Oparina L.A.* Application of information modelling technologies for construction time management // *Smart Composite in Construction*. 2021. V. 2. № 2. P. 48–55. DOI: 10.52957/27821919_2021_2_48
17. *Sarvari H., Chan D.W.M., Alaeos A.K.F., Olawumi T.O., Aldaud A.A.A.* Critical success factors for managing construction small and medium-sized enterprises in developing countries of Middle East: Evidence from Iranian construction enterprises // *Journal of Building Engineering*. 2021. V. 43. DOI: 10.1016/j.job.2021.103152
18. *Vivek A., Rao H.* Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects // *International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing*. 2022. V. 60. Part 3. P. 1696–1701. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.228
19. *Velichkin V.Z., Petrochenko M.V., Strelets K.I., Zavodnova E.B., Gorodishenina A.Yu.* The branch and bound method applied to the construction of residential quarters // *Vestnik MGSU*. 2021. V. 16 (1). P. 91–104. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.91-104
20. *Yilmaz S., Irmak M.A., Qaid A.* Assessing the effects of different urban landscapes and built environment patterns on thermal comfort and air pollution in Erzurum city, Turkey // *Building and Environment*. 2022. V. 219. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109210

REFERENCES

1. *Borisyyuk N.K., Smotrina O.S.* On Enterprise Functioning in Unstable External Environment. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*. 2022; (2): 24–30. DOI: 10.25198/2077-7175-2022-2-24. EDN: XLJDGS (In Russian)
2. *Dyachkova O.N., Mikhailov A.E., Yakunina G.V.* Experience in Assessing the Attractiveness of District Parks in Saint-Petersburg. *Sotsiologiya goroda*. 2022; (3): 49–63. DOI: 10.35211/19943520_2022_3_49 (In Russian)
3. *Zelentsov L.B.* Implementation of Construction Projects with Changing Functional Purpose. *Stroitel'noe proizvodstvo*. 2021; (2): 26–32. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_26. EDN: BZKXLZ (In Russian)
4. *Zelentsov L.B., Tsapko K.A., Belikova I.F., Pirko D.V.* Modern Methods for Assessing the Organizational and Technological Reliability of Investment and Construction Complex. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2020; 9. Available: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6602 (accessed April 28, 2023). (In Russian)
5. *Lebedev V.M.* Organizational and Technological Reliability of Construction Management Systems. *Vestnik MGSU*. 2008; (4): 191–194. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskaya-nadezhnost-upravlyayuschih-sistem-stroitelstva-1> (accessed April 28, 2023). (In Russian)
6. *Rodin D.A.* Accounting for Uncertainty and Risk Factors in Investment Project Evaluation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela*. 2022; (3–4): 19–25. EDN: TJRDTU (In Russian)
7. *Safaryan G.B.* Critical Analysis of Generalized Model of Construction System. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2021; 11 (4): 41–47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN: PFGTCK (In Russian)

8. Tsopa N.V., Khalilov A.E. Resource Provision for Investment and Construction Projects. *Ehkonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2022; 1–2 (82–83). 23–30. EDN: KOSHPG (In Russian)
9. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing Environmentally Sustainable and Cost-effective Geopolymer Concrete with Improved Characteristics. *Sustainability*. 2021; (13): 13607. DOI: 10.3390/su132413607
10. Chen Yi, Zhu D., Tian Z., Guo Q. Factors Influencing Construction Time Performance of Prefabricated House Building: A Multi-Case Study. *Habitat International*. 2023; 131. DOI: 10.1016/j.habitatint.2022.102731
11. Díaz-López C., Serrano-Jiménez A., Verichev K., Barrios-Padura A. Passive Cooling Strategies to Optimize Sustainability and Environmental Ergonomics in Mediterranean Schools Based on a Critical Review. *Building and Environment*. 2022; 221. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109297
12. Falah Al-Alrubaie. The Identity of the Economic System in Iraq Between the Rentier State and the Developmental State. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021; 484 (2019): 12–38.
13. Huang X. A Decision-Making Model for Optimizing Project Performance in Construction. *International Journal of Project Management*. 2018. DOI: 10.1016/j.ijproman.2017.08.005
14. Krichevsky M., Martynova J., Dmitrieva S. Use of Neural Networks to Assess Competitiveness of Organizations. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies'*. 2019. Pp. 72–82. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_8
15. O'Neill C., Gopaldasani V., Coman R. Factors that Influence the Effective Use of Safe Work Method Statements for High-Risk Construction Work in Australia – A Literature Review. *Safety Science*. 2022; 147. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105628
16. Oparina L.A. Application of Information Modelling Technologies for Construction Time Management. *Smart Composite in Construction*. 2021; 2 (2): 48–55. DOI: 10.52957/27821919_2021_2_48
17. Sarvari H., Chan D.W.M., Alaeos A.K.F., Olawumi T.O., Aldaud A.A.A. Critical Success Factors for Managing Construction Small and Medium-Sized Enterprises in Developing Countries of the Middle East: Evidence from Iranian Construction Enterprises. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43. DOI: 10.1016/j.job.2021.103152
18. Vivek A., Rao H. Identification and Analysis of Risk Factors Affecting Cost of Construction Projects. In: *Proc. Int. Conf. on Latest Developments in Materials and Manufacturing*. 2022; 60, Part 3, 1696–1701. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.228
19. Velichkin V.Z., Petrochenko M.V., Strelets K.I., Zavodnova E.B., Gorodishenina A.Yu. The Branch and Bound Method Applied to the Construction of Residential Quarters. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (1): 91–104. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.91-104 (In Russian)
20. Yilmaz S., Irmak M.A., Qaid A. Assessing the Effects of Different Urban Landscapes and Built Environment Patterns on Thermal Comfort and Air Pollution in Erzurum City, Turkey. *Building and Environment*. 2022; 219. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109210.

Сведения об авторах

Джавед Сират, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, jawed.serat@yandex.ru

Александр Алексеевич Руденко, докт. экон. наук, канд. техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, rudenko.a@mail.ru

Authors Details

Jawed Serat, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, jawed.serat@yandex.ru

Aleksandr A. Rudenko DSc, Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, rudenko.a@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2025
Одобрена после рецензирования 21.04.2025
Принята к публикации 30.05.2025

Submitted for publication 28.03.2025
Approved after review 21.04.2025
Accepted for publication 30.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 189–205.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 189–205.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.059.4:621.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-189-205

EDN: MUGZKD

ТЕХНОЛОГИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ

**Людмила Дмитриевна Морщакова, Галина Андреевна Бардина,
Александра Игоревна Зацепина**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Статья посвящена проблеме обеспечения доступа к фасадам зданий для проведения обслуживающих работ с целью поддержания их эксплуатационных характеристик.

Цель исследования заключается в выявлении общих принципов применения технологий обслуживания фасадов зданий, способствующих типизации и унификации решений, и разработке практических рекомендаций по их применению.

Методы исследования включают анализ отечественного и зарубежного опыта эксплуатации систем обслуживания фасадов, сравнительный анализ различных методов обслуживания (с учетом их особенностей, преимуществ и недостатков), а также определение критериев выбора систем обслуживания зданий с различными архитектурно-конструктивными решениями.

В **результате** исследования установлены особенности выполнения работ для каждого способа обслуживания, определены критерии, влияющие на выбор системы: высота здания, геометрия фасада, номенклатура работ и технические возможности реализации. Разработанные рекомендации позволяют обоснованно выбирать технологии обслуживания фасадов на этапе концептуального проектирования.

Ключевые слова: системы обслуживания фасадов, фасадный подъемник, ВМУ, монорельсовая система, промышленный альпинизм, архитектура, эксплуатация зданий, высотные работы

Для цитирования: Морщакова Л.Д., Бардина Г.А., Зацепина А.И. Технология обслуживания фасадов зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 189–205. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-189-205. EDN: MUGZKD

ORIGINAL ARTICLE

BUILDING FACADE MAINTENANCE

Lyudmila D. Morshchakova, Galina A. Bardina, Aleksandra I. Zatsepina
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article is devoted to the problem of providing access to building facades in order to maintain their operational characteristics.

Purpose: The purpose of the study is to identify general principles of building facade maintenance that contribute to typification and unification of solutions, and develop practical recommendations for their application.

Methodology: Research methods include the analysis of Russian and foreign experience in operating facade maintenance systems, comparative analysis of various maintenance methods (taking into account their features, advantages and disadvantages), and determining criteria for selecting building maintenance systems with different architectural and design solutions.

Research findings: Maintenance methods are proposed, the criteria influencing the choice of a system are determined: building height, facade geometry, works and technical feasibility of implementation.

Practical implications: The developed recommendations allow for a reasonable choice of facade maintenance at the conceptual design stage.

Keywords: maintenance systems, facade hoist, monorail system, industrial climbing, architecture, building maintenance, high-rise works

For citation: Morshchakova L.D., Bardina G.A., Zatsepina A.I. Building Facade Maintenance. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 189–205. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-189-205. EDN: MUGZKD

Введение

Современная архитектура характеризуется разнообразием фасадных решений, включая изогнутые, асимметричные формы и элементы, выступающие за пределы основного объема здания. Особую популярность приобрели светопрозрачные фасады, которые широко применяются в административных, жилых и многофункциональных зданиях. Однако такие фасады требуют регулярного и профессионального обслуживания, включающего очистку, ремонт и замену поврежденных элементов. Данные меры необходимы не только для сохранения эстетической составляющей здания, но и для поддержания функциональных характеристик остекления, таких как светопропускание и сопротивление теплопередаче. Поэтому для обеспечения успешной эксплуатации здания проектирование систем обслуживания фасадов становится одной из актуальных задач на этапе разработки проекта.

Анализ требований приказа Минтруда России от 16.11.2020 № 782н и ГОСТ EN 795–2019 свидетельствует о высокой степени регламентации безопасности при проведении высотных работ с использованием временных средств доступа (специализированное оборудование для промышленного альпинизма), устанавливая строгие технические требования к анкерным устройствам и иным средствам индивидуальной защиты от падения с высоты. Проектирование стационарных систем доступа к фасадам не регламентировано действующими нормативными документами. Национальные стандарты, такие как ГОСТ 34688–2020, ГОСТ EN 280–2016, ориентированы на регулирование использования грузоподъемных механизмов общего назначения, но при этом игнорируют специфические особенности в обслуживании фасадов. Наиболее доступными источниками информации для проектировщиков о стационарных системах обслуживания фасадов (СОФ) являются сайты поставщиков и представителей зарубежного оборудования, однако предоставляемая ими информация неполная, в связи с сохранением компаниями коммерческой выгоды и предложения услуг по проектированию данных систем. Сложившаяся ситу-

ация создает существенные трудности для проектировщиков, вынужденных определять способы обеспечения доступа к фасадам на этапе концептуального проектирования без соответствующей нормативной базы.

Основная цель исследования заключается в выявлении общих принципов применения СОФ, способствующих типизации и унификации решений по обслуживанию фасадов зданий.

Методы исследования

Для выбора оптимального способа обслуживания фасадов необходимо учитывать область применения, технические параметры и требования к монтажу и эксплуатации выбранного механизма или системы, обеспечивающей доступ к обслуживаемым поверхностям здания. В ходе исследования были изучены пять распространённых способов обслуживания фасадов, выявлены особенности их применения, преимущества и недостатки, а также виды работ, реализация которых становится возможной при использовании каждого. Анализ технических характеристик, требований к монтажу и эксплуатации, области применения систем обслуживания фасадов проводился на основе технической документации производителей и поставщиков оборудования [1, 2], рекомендаций и иностранных руководств по применению систем обслуживания фасадов [3, 4, 5], а также практического опыта эксплуатации аналогичных систем на реализованных объектах [6].

Для выявления закономерностей использования различных систем обслуживания фасадов был проведен анализ отечественного и зарубежного опыта строительства. Всего было рассмотрено 50 объектов, где успешно применены и продолжают использоваться системы обслуживания фасадов: 25 российских проектов (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Казань) и 25 иностранных проектов (США, Великобритания, Германия, Нидерланды, Финляндия, ОАЭ, Филиппины, Индия, Сингапур, Швеция, Южная Корея). Поиск объектов осуществлялся путем визуального анализа современной архитектуры городов, а также изучения электронных портфолио проектов компаний-поставщиков и производителей оборудования СОФ: Tractel Secalt (Франция, Люксембург), Geda Lift «Гедэ лифт» (Германия), Manntech (Германия), Rostek – Финляндия, Aesa (Нидерланды), Cox Gomyt (Австралия).

Проанализированные проекты различаются по этажности, конструктивным и архитектурным решениям. При анализе были исключены уникальные высотные здания, т. к. их обслуживание требует разработки специальных СОФ в индивидуальном исполнении. Практический опыт (например, «Лахта Центр») демонстрирует, что для уникальных высотных зданий с большой криволинейной площадью фасадов предпочтительны автоматизированные ВМУ-системы, позволяющие значительно сократить время обслуживания по сравнению с ручными методами. Кроме того, не учитывались объекты, обслуживание которых осуществлялось исключительно промышленными альпинистами без предварительного учета мероприятий по их безопасности в проектной документации (данный метод позволяет решать задачи любой сложности, но не поддается стандартизации и не отражает системных подходов к организации доступа).

Полученные результаты анализа легли в основу классификации пяти основных способов обслуживания фасадов по выявленным ключевым параметрам (таким как требования к монтажу, влияние на архитектуру, производительность, мобильность, доступность сложных участков и возможность замены элементов) и разработки практических рекомендаций по их применению.

Основные результаты

В табл. 1 представлены характеристики рассматриваемых способов обслуживания фасадов и оборудования обеспечения доступа (access equipment):

1. Обслуживание фасадов зданий с привлечением промышленных альпинистов (с соблюдением всех требований и мероприятий по безопасной работе на высоте).
2. Использование выносных консолей – шлюпбалок (Davit system).
3. Монорельсовая система (Monorail system).
4. Стационарные системы обслуживания фасадов (Building Maintenance Unit) – с базовой точкой установки или в комбинации с системой подъездных путей.
5. Наземные передвижные подъемные машины (подъемники) (Boom lifts).

Анализ наиболее распространенных способов обслуживания фасадов

При выборе метода обслуживания фасадов должны учитываться архитектурные и конструктивные особенности, высота и геометрия здания, объемы и тип проводимых работ по обслуживанию фасадов, а также технические параметры применяемого оборудования СОФ. Промышленный альпинизм – универсальный способ, не требующий монтажа сложного оборудования для осуществления работ на высоте, однако имеет ограничения по грузоподъемности и производительности. Этот способ предпочтителен для локальных задач, таких как очистка остекления или мелкий ремонт, но менее эффективен при замене крупных фасадных элементов [4]. Использование выносных опор эффективно на вертикальных плоскостях, но их применение затруднительно на объектах с нестандартной конфигурацией фасада, а необходимость частых перестановок снижает темпы выполнения работ. Монорельсовые системы удобны для обслуживания протяженных фасадов, обеспечивая перемещение как по горизонтали, так и по вертикали, но имеют ограничения по максимальной высоте эксплуатации (до 80–130 м), а работа с выступающими элементами фасада требует дополнительных технических решений. Наземные подъемные машины мобильны и применимы как для внутренних, так и для наружных работ. Однако их использование предполагает значительное свободное пространства для размещения техники. Низкая скорость выполнения операций и ограниченный радиус действия являются недостатками данного метода [3]. Стационарные системы (BMU) обеспечивают высокую грузоподъемность, автоматизацию рабочих процессов и доступ к труднодоступным участкам, однако требуют дополнительных инженерных расчетов на стадии проектирования здания и могут оказывать влияние на его архитектурный облик [2].

Таблица 1

Table 1

Сравнительные технические характеристики способов обслуживания фасадов

Comparative parameters of façade maintenance

Параметр	Промышленный альпинизм	Выносные консоли – шлюпбалки	Монорельсовая система	Стационарные системы	Наземные подъемные машины
Описание	Использование альпинистского снаряжения для обслуживания фасадов здания	Такелажная система с рабочей платформой (люлькой) и выносными опорами	Направляющие профили по периметру фасада с рабочей платформой	Автоматизированное стационарное устройство с крановой установкой на кровле или иных поверхностях здания	Ножничные, мачтовые и стреловые подъемники для временного доступа к фасадам – как изнутри, так и снаружи
Требования к монтажу	Наличие анкерных устройств, встроенных в конструкцию здания (анкерные линии, анкерные точки, анкерные столбы, анкерные переносные устройства, противовесные системы)	Возможность установки опорных элементов (наличие возможности установки креплений к стене/плите/плите кровли) Пространство для маневренности и перемещения	Наличие возможности надежной периметральной установки моно-рельса, доступ к электроэнергии	Конструктивное основание, рассчитанное на нагрузку от стационарной СОФ, место хранения и доступ к электроэнергии и доступ к электроэнергии Необходимость наличия в штате высококвалифицированных рабочих-операторов и иного персонала ИТР для обслуживания и работы с данными установками	Свободный доступ ко всем обслуживаемым поверхностям снизу Требование свободного пространства (ограничение пешеходных и транспортных потоков) Наличие места хранения подъемных механизмов для возможной организации оперативного обслуживания фасадов
Влияние на архитектурный облик здания	Отсутствует	Отсутствует (ввиду возможности демонстрации выносных опор)	Выступает за лицевую поверхность фасада (но имеет возможность интеграции в выступающие фасадные элементы)	В случае применения габаритной установки и отсутствия места для ее хранения: видимость как с вышоты, так и с поверхности земли	Отсутствует

Продолжение табл. 1
Continuation

Параметр	Промышленный альпинизм	Выносные консоли – шлюпбалки	Монорельсовая система	Стационарные системы	Наземные подъемные машины
Регулирование темпов работ	Посредством изменения количества задействованных альпинистов	Посредством изменения количества задействованных рабочих платформ	Посредством изменения количества задействованных рабочих платформ	Посредством изменения количества одновременно используемой техники В рамках одной единицы техники скорость ограничения	Посредством изменения количества одновременно используемой техники В рамках одной единицы техники скорость ограничения
Ширина рабочей зоны обслуживания	Ограничена физиологическими способностями рабочего (0,5–1,2 м)	Зависит от габаритов рабочей платформы – изменяемый параметр (1,5–12 м)	Зависит от габаритов рабочей платформы – изменяемый параметр (1,5–4 м)	Зависит от габаритов рабочей платформы – изменяемый параметр (1,5–8 м)	Зависит от габаритов рабочей платформы (0,5–6 м)
Ограничение передвижений	Ограничение перемещения по горизонтали при отсутствии дополнительных устройств (анкерных линий) – временные затраты по переносу анкерных закреплений Усложнение работ и увеличение сроков при росте высоты здания	Отсутствие свободного перемещения по горизонтали – временные затраты по переносу и повторной установке выносных опор	Возможность перемещения по горизонтали и вертикали. Эффективны при протяженной форме здания Ограничения применения по высоте до 80–130 м	Отсутствие ограничений передвижения	Ограниченные горизонтальные перемещения Высота подъема зависит от типа применяемого подъемника: 18 м для мачтовых и ножничных подъемников, 50 м для стреловых подъемников

Продолжение табл. 1
Continuation

Параметр	Промышленный альпинизм	Выносные консоли – шлюпбалки	Монорельсовая система	Стационарные системы	Наземные подъемные машины
Доступ к трудно-доступным участкам здания	Без ограничений	Усложнение работ при непрямолинейной форме здания в плане (привлечение иных технологий, в том числе использования труда промальпинистов)	Ввиду маневренности обеспечивают доступ на изогнутых участках фасада Сложность в обеспечении доступа при наличии выступающих элементов без привлечения иных технологий	За счет вылета стрелы достигается большая площадь обслуживания, обеспечивается доступ к труднодоступным местам Различные конфигурации рабочих платформ (люлек), к примеру, оснащенных противовесами, обеспечивают доступ к нелинейным участкам фасада	Обеспечивается за счет смены места стоянки техники
Возможность замены фасадных элементов и подьема оборудования на высоту	Отсутствие возможности подьема крупногабаритных и тяжелых фасадных элементов или оборудования без дополнительного грузоподъемного оборудования	Возможность транспортировки крупногабаритных грузов ограничена габаритами и грузоподъемностью фасадной люльки Применение усиленной конструкции шлюпбалки (выносной опоры) для обеспечения необходимыми грузоподъемности	Возможность транспортировки крупногабаритных грузов ограничена габаритами и грузоподъемностью фасадной люльки В случае необходимости подачи на высоту тяжелого габаритного груза требуется осуществление подачи изнутри здания или применение дополнительного грузоподъемного оборудования	За счет встроенных дополнительных лебедок возможность проведения ремонтных работ без привлечения иной грузоподъемной техники Возможность индивидуальной сборки стационарной системы под требуемые параметры и характеристики проекта	Обеспечивается в рамках грузоподъемности рабочей платформы Неэффективен для замены стеклопакета или монтажа крупногабаритного оборудования

Окончание табл. 1
End of table 1

Параметр	Промышленный альпинизм	Выносные консоли – шлюпбалки	Монорельсовая система	Стационарные системы	Наземные подъемные машины
Работы по обслуживанию фасадов	Мойка фасадов	Мойка фасадов Замена некрупногабаритного оборудования Малый ремонт фасадных элементов	Мойка фасадов Замена некрупногабаритного оборудования Малый ремонт фасадных элементов	Мойка фасадов Замена (ремонт) фасадных элементов Обслуживание/ремонт оборудования на фасаде здания	Мойка фасадов Замена некрупногабаритного оборудования Малый ремонт фасадных элементов
Работы по обслуживанию фасадов с применением дополнительного грузоподъемного оборудования	Замена (ремонт) фасадных элементов Обслуживание/ремонт оборудования на фасаде здания	Замена (ремонт) фасадных элементов Обслуживание/ремонт оборудования на фасаде здания	Замена (ремонт) фасадных элементов Обслуживание/ремонт оборудования на фасаде здания	Не требуется дополнительное оборудование	Замена (ремонт) фасадных элементов Обслуживание/ремонт оборудования на фасаде здания

Анализ отечественного и зарубежного опыта строительства

В качестве одного из критериев классификации применяемых систем обслуживания фасадов при анализе отечественного и зарубежного опыта был принят показатель высоты здания. На основании проведенного анализа был составлен график зависимости между высотой здания и используемыми системами обслуживания фасадов (рис. 1).

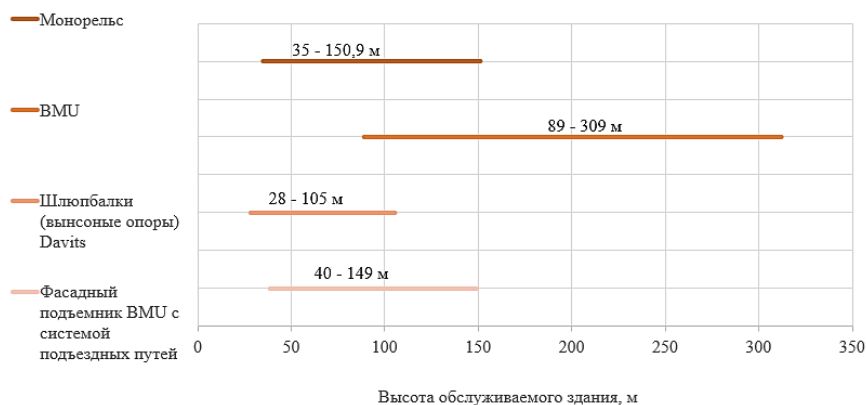


Рис. 1. График зависимости применяемой СОФ и высоты обслуживаемого здания

Fig. 1. Facade maintenance vs. building height

Согласно полученным данным, наиболее универсальной системой являются установки типа ВМУ (Building Maintenance Units), размещаемые на крыше здания. Этот способ охватывает самый широкий диапазон высот – до 309 м, а производители оборудования утверждают возможность работы на высоте до 500 м [2]. Фасадные подъемники ВМУ, совмещенные с системой подъездных путей (двойные рельсовые пути или бетонная колея с направляющим уголком), применялись на объектах высотой от 40 до 149 м, часто оснащенных стеклянными парапетами. Здания с меньшей этажностью чаще оборудовались выносными опорами (Davit systems), которые используются как для перемещения люлек, так и для крепления страховочных устройств при работе промышленных альпинистов. Эти системы использовались на сооружениях высотой от 28 до 105 м, хотя иногда они выполняли вспомогательные функции для обслуживания отдельных участков фасада. Также широко распространены монорельсовые системы, крепящиеся либо непосредственно к фасадам, либо скрытым образом в элементах конструкции здания. Они охватили диапазон высот от 35 до 151 м.

Второй параметр, который подвергся анализу, – это длина фасада (периметр) здания. Выбор системы обслуживания фасадов непосредственно зависит от протяженности фасада: чем длиннее участок, тем больше площадь обслуживания, тем выше требования к таким характеристикам, как вылет стрелы ВМУ, длина монорельса или количество опор для установки шлюпбалочных систем [12]. Аналогично первому графику была построена зависимость между протяженностью фасада и способами его обслуживания (рис. 2).

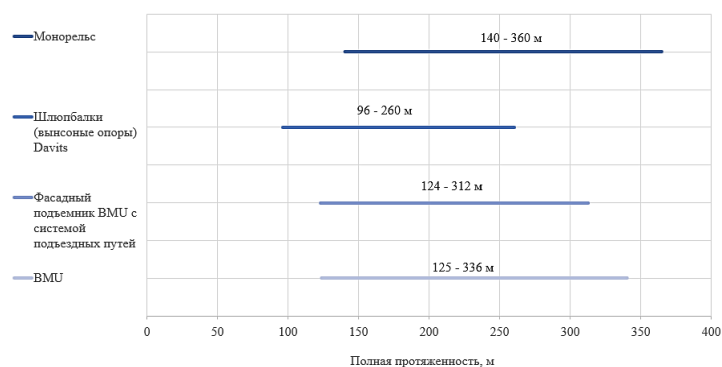


Рис. 2. График применяемых СОФ в зависимости от полной протяженности обслуживаемого здания

Fig. 2. Facade maintenance vs. total building length

На основании анализа можно заключить, что для зданий с большой протяженностью фасада наиболее предпочтительным вариантом является установка монорельсов. Максимальная зафиксированная длина монорельсового пути составляла 360 м, однако известны случаи, когда длина монорельса достигала 500 м и более (к примеру, Jewel of the Creek, Dubai) [11]. Фасадные подъемники BMU (центрально установленные на кровле и комбинированные с системой направляющих профилей) также показали свою эффективность на объектах с протяженными фасадами, охватывая диапазон от 125 до 330 м. Шлюпбалочные системы чаще всего применялись на менее длинных участках фасада, начиная с 96 и заканчивая 260 м.

При анализе закономерностей применения различных способов обеспечения доступа к фасаду важную роль играет геометрия здания, в частности форма фасада в плане. На основе изученных объектов была собрана статистика распределения типов форм зданий в плане относительно используемых способов обслуживания (рис. 3).

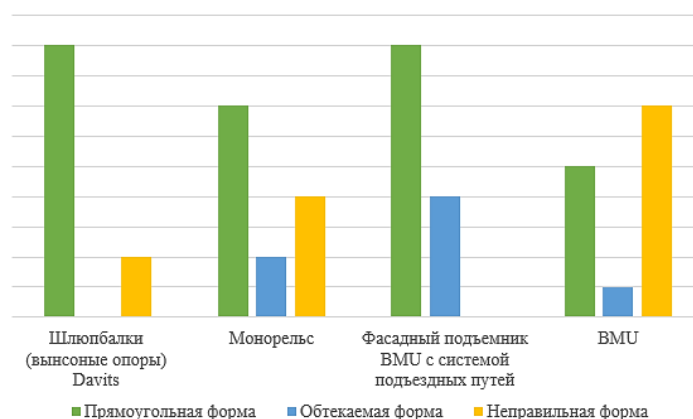


Рис. 3. Применение способов обслуживания фасадов в зависимости от типа формы

Fig. 3. Facade maintenance vs. building geometry

Анализ результатов показывает, что прямоугольные здания чаще всего обслуживаются с помощью шлюпбалок или фасадных подъемников ВМУ в комбинации с системой подъездных путей. Для зданий обтекаемой формы преобладающим способом стало использование монорельсов, установленных как по периметру, так и на кровле, тогда как шлюпбалки для таких конструкций практически не применялись. Что касается зданий неправильной формы, предпочтение отдавалось центральным ВМУ-установкам благодаря их способности обеспечивать полный доступ к любым участкам фасада посредством поворота и вылета стрелы. Периметральный монорельс также использовался в ряде случаев, а шлюпбалки служили дополнительным средством для обеспечения доступа там, где мощности основных систем оказывались недостаточными.

Важным аспектом при оценке возможности применения тех или иных систем обслуживания фасадов явилось наличие выступающих элементов на фасаде здания, которые усложняют процесс обеспечения доступа, особенно если основные механизмы расположены в уровне кровли. Поэтому был проведен дополнительный анализ влияния присутствия или отсутствия таких элементов на выбор систем обслуживания (рис. 4).

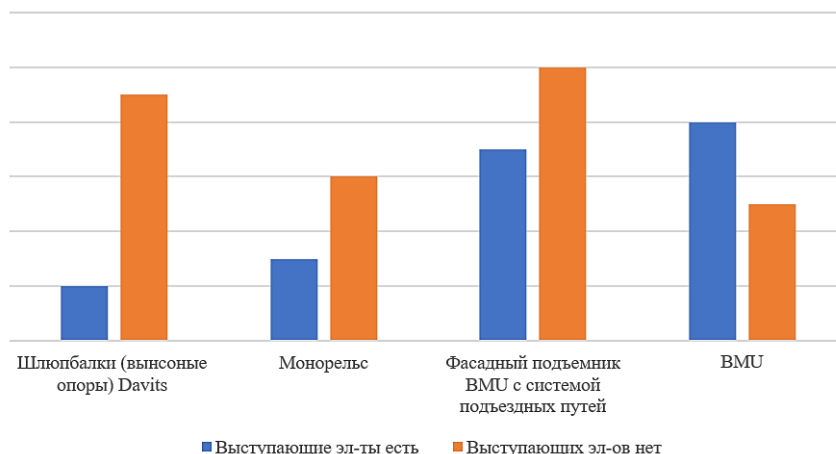


Рис. 4. Влияние наличия выступающих элементов на применяемый способ обслуживания фасадов

Fig. 4. Facade maintenance methods vs. protruding elements

Наиболее распространенным способом обеспечения доступа к фасадам зданий с наличием выступающих элементов оказалось использование ВМУ-установок. Фасадные подъемники ВМУ в комбинации с системой подъездных путей универсальны и применимы независимо от наличия выступающих элементов [7]. Выносные опоры не были оптимальны для фасадов с большим количеством выступающих элементов, однако демонстрировали высокую эффективность при локальном применении на определенных участках фасада.

В рамках сопоставления отечественного и зарубежного опыта была сформирована сравнительная статистика (рис. 5), отражающая степень распространенности различных способов обслуживания зданий (за исключением исполь-

зования труда промышленных альпинистов, которое остается доминирующим в отечественной практике).

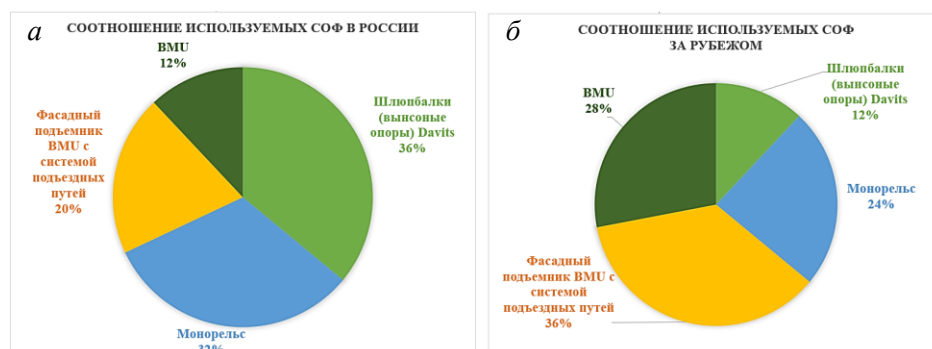


Рис. 5. Диаграммы процентного соотношения использования СОФ в России (а) и за рубежом (б)

Fig. 5. Percentage distribution of facade maintenance in Russia (a) and abroad (b)

Как видно из диаграмм, в отечественной практике наиболее распространенными решениями для выполнения высотных работ являются системы с использованием монорельсов и выносных опор. Следует отметить, что в большинстве случаев эти системы устанавливаются не для оптимизации клининговых операций с применением фасадных люлек, а в первую очередь как основное анкерное крепление для промышленных альпинистов. В то же время зарубежный опыт демонстрирует активное внедрение автоматизированных систем фасадных подъемников, что способствует значительному сокращению сроков и повышению уровня безопасности при проведении работ по обслуживанию зданий. Данные диаграмм показывают, что в России преобладают монорельсовые системы (32 %) и шлюпбалки (36 %), тогда как за рубежом чаще используют автоматизированные фасадные подъёмники (36 %) и стационарные ВМУ (28 %). Это свидетельствует о более высокой степени механизации и безопасности в международной практике, что может служить ориентиром для модернизации отечественных методов обслуживания фасадов.

Результаты исследования были занесены в единую обобщающую табл. 2, которая может быть использована проектировщиками при концептуальном выборе оптимального способа обслуживания фасадов зданий.

Данные табл. 2 позволят принять решение на основе исходных параметров, таких как высота здания, форма здания в плане, периметр обслуживаемой фасадной поверхности, наличие выступающих элементов, перечень необходимых работ по обслуживанию, а также вес наиболее габаритных элементов, подлежащих замене в процессе эксплуатации (например, стеклопакетов). Анализируя эти данные совместно с требованиями к монтажу различных систем, включая доступную площадь для установки выбираемой СОФ, возможность устройства фундамента под основные механизмы и подключение к инженерным сетям здания, можно определить один или несколько наиболее подходящих способов обеспечения доступа к фасадам, эффективных к применению для конкретного проекта здания.

Таблица 2

Критерии оптимального выбора систем обслуживания фасадов для зданий различного типа

Table 2

Criteria for selecting the best facade maintenance systems for different types of buildings

Параметр	Промышлен- ный альпинизм	Выносные консоли – шлюпбалки	Монорельсовая система	Фасадный подъемник ВМУ в комбинации с системой подъезд- ных путей	Стационарные си- стемы обслуживания фасадов типа ВМУ	Наземные подъем- ные машины
Высота здания, м	Любая	28–100	Традиционно: до 40–80 м Индивидуально: до 130 м*	Традиционно: до 125–270 м Индивидуально: до 500 м*	Традиционно: до 125–270 м Индивидуально: до 760 м*	До 18 м – для нож- ничных и маятников подъемников, до 50 м – стреловые
Протяжен- ность здания	Любая	Полная протяжённость до 250 м	Любая Эффективно при боль- шой протяженности здания	Любая Эффективен при большой протяженно- сти здания	Любая при радиусе покрытия всех обслу- живаемых поверхно- стей	До 50 м – опти- мально
Форма здания	Любая	Прямоугольная Неправильная	Прямоугольная Обтекаемая Неправильная и др.	Прямоугольная Обтекаемая и др.	Прямоугольная Обтекаемая Неправильная и др.	Прямоугольная Обтекаемая Неправильная и др.
Наличие вы- ступающих элементов	Не имеет зна- чения	Нет	Возможно при оснаще- нии яруса/уступа осна- щается доп. монорель- сом	Не имеет значения	Не имеет значения	Нет
Скорость выполнения работ, м ² /ч	30	30 (при использовании выносной опоры в ка- честве анкерного устройства) 120 (при работе из люльки)	30 (при использовании монорельса как анкер- ной линии) 120 (при работе из люльки)	150	150	70–90

Окончание табл. 2
End of table 2

Параметр	Промышленный альпинизм	Выносные консоли – шлюпбалки	Монорельсовая система	Фасадный подъемник ВМУ в комбинации с системой подъездных путей	Стационарные системы обслуживания фасадов типа ВМУ	Наземные подъемные машины
Грузоподъемность системы	200 кг (при работе специалиста со страхующим напарником)	Традиционно: до 350–500 кг	Традиционно: до 350–500 кг Индивидуально: до 700–900 кг	Традиционно: до 240–500 кг Индивидуально: до 4000 кг	Традиционно: до 240–1000 кг Индивидуально: до 4000 кг	Традиционно: до 150–450 кг Усложненные модели: до 1500 кг
Требования	Наличие анкерных устройств (анкерные линии, анкерные точки, анкерные столбы, анкерные переносные устройства, противовесные системы)	Привлечение дополнительных технологий при наличии выступающих элементов Необходимость организации подачи подъемных элементов изнутри здания, в случае наличия габаритных элементов фасадных систем весом выше 40 кг Наличие базы для монтажа переносных опор по всему периметру кровли Наличие в объеме задания помещения для организации хранения СОФ	Устройство направляющих для передвижения фасадной люльки Привлечение дополнительных технологий при наличии выступающих элементов Необходимость организации подачи подлежащих к замене фасадных элементов изнутри здания Наличие элементов для подключения оборудования и осуществления ремонтных или клининговых работ В зависимости от климатического исполнения фасадного подъемника может потребоваться крытое пространство для его хранения	Устройство направляющих рельсов на кровле, парапетах для передвижения фасадного подъемника Наличие подвода коммуникаций для подключения оборудования Наличие подвода коммуникаций для подключения оборудования В зависимости от климатического исполнения фасадного подъемника может потребоваться пространство для его хранения	Обладает большим весом – требует устройства фундамента по месту установки Наличие подвода коммуникаций для подключения оборудования Подобранный вылет стрелы фасадного подъемника должен обеспечивать доступ ко всем обслуживаемым поверхностям фасада В зависимости от типа климатического исполнения может потребоваться пространство для хранения машины	Возможность ограничения потока посетителей здания с целью размещения техники для проведения работ по обслуживанию фасада

* Значения определены на основании практического опыта индивидуального исполнения и эксплуатации оборудования на объектах.

Влияние систем обслуживания фасадов на проектные решения

Любой способ обеспечения доступа к фасаду здания оказывает влияние на архитектурные и конструктивные решения, а также на нагрузку инженерных систем объекта, поэтому комплексный подход к проектированию технологии обслуживания фасадов является необходимым условием.

Элементы систем обеспечения доступа к фасаду, такие как монорельсовые пути, анкерные опоры, автоматизированные установки, должны соответствовать эстетическим требованиям и быть гармонично интегрированы в общую концепцию фасада, исключая возникновение визуальной перегрузки. В случаях, когда СОФ не предусматривает транспортировку заменяемого элемента, например стеклопакета снаружи здания, необходимо предусмотреть его беспрепятственное перемещение внутри. Это подразумевает обеспечение соответствующих размеров проемов и габаритов помещений для внутренней транспортировки стеклопакета, необходимой грузоподъемности вертикального транспорта для подъема элементов на требуемый уровень, а также наличие свободного пространства для маневрирования малых средств механизации, таких как стеклороботы с манипуляторами и телескопические подъемники, предназначенные для транспортировки заменяемых элементов фасада [4].

Монтаж каждой системы обслуживания фасадов обладает своими требованиями и особенностями, влияющими на конструктивные решения оснований (фундаментов для оборудования) – кровли, парапетов и других поверхностей здания, где производится установка опор механизмов. Конкретные монтажные требования определяются производителем оборудования, обладающим соответствующими сертификатами безопасности и выполняющим последующие испытания перед вводом системы в эксплуатацию [8]. Однако уже на этапе концептуального проектирования можно оценить предварительные статические и динамические нагрузки и, исходя из местоположения установки выбранной системы, определить необходимость усиления тех или иных конструкций для успешной интеграции СОФ в проект [9].

Для подключения щитов управления, лебедок и прочих грузоподъемных механизмов требуется учет нагрузок в общих электрических нагрузках здания. Кроме того, согласно требованиям приказа Минтруда России от 16.11.2020 № 782н, требуется предусмотреть автоматику для сценария аварийной работы при перебоях в электроснабжении здания или возникновении пожара, в случае которого важно обеспечить безопасную эвакуацию рабочих, обслуживающих фасад здания [10].

Заключение

Проведенное исследование систематизировало подходы к выбору систем обслуживания фасадов в зависимости от архитектурных, конструктивных и эксплуатационных характеристик зданий. На основе анализа нормативной документации, технических характеристик оборудования, а также отечественного и зарубежного проектного опыта были установлены типовые зависимости между высотой здания, протяженностью и геометрией фасадов, наличием выступающих элементов, характером эксплуатационных задач и применяемыми типами СОФ.

Наиболее универсальными оказались стационарные установки типа ВМУ, обладающие высокой грузоподъемностью и способностью обслуживать фасады на значительной высоте, включая участки со сложной геометрией. Монорельсовые системы продемонстрировали эффективность при протяженных и обтекаемых фасадах, тогда как системы на выносных опорах (шлюпбалки) являются оптимальными для зданий средней этажности и при локальных видах работ.

Обобщенная классификация, предложенная в данной работе, может служить практическим инструментом для архитекторов, инженеров и проектировщиков при выборе рационального решения по обслуживанию фасадов на этапах предпроектного анализа и концептуального проектирования. Формирование таких универсальных подходов способствует стандартизации проектных решений, интеграции СОФ в архитектурно-конструктивную модель здания и повышению качества городской застройки в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Key to access*. Facade and glass roof access systems. Espoo, Finland : ROSTEK OY, 2018. 19 p.
2. *Facade Access Systems*. Product Guide. Mammendorf, Germany : Manntech. Part of Alimak group, 2022. 39 p.
3. *Weismantle P., Thompson K., Torem E.* Facade Access and Maintenance for High-Rise Buildings: Technical Guide. CTBUH: CTBUH Facade Access Working Group, 2018. 117 p.
4. *Facade Access Design Guide*. – Ver 1.1. Singapore : Building and Construction Authority, 2019. 47 p.
5. *Building Maintenance Unit*. Köln, Germany : FBA Gomyl, 2017. 14 p.
6. *Hussain A.* Facade Access: Engineering Excellence Meets Architectural Challenges. Chennai, India : Notion Press, 2020. 240 p. ISBN 978-1649198631.
7. *Replacing windows at hard-to-reach facade areas* // *Facadexs*. Building Maintenance. URL: <https://facadexs.com/blog-replacing-windows-at-hard-to-reach-facade-areas/> (дата обращения: 14.04.2025).
8. *Jonathan E. Lewis, Stephen B. Schmitt, Gwentyth R. Searer* Design and Load Testing of Facade Access Equipment // *Concrete Repair Bulletin (CRB)*. 2021. January/February. P. 20–24.
9. *Nurhidayat Djoko.* Setyanto Design a Suspended Access Equipment of Pakubuwono Spring Apartment // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2019. T. 14. № 14. P. 3311–3316. ISSN 0973-4562.
10. *BS EN 1808:2015*. Safety requirements for suspended access equipment. Design calculations, stability criteria, construction. Brussels : BSI Standards Limited, 2015. 136 p. ISBN 978-0-580-72823-5.
11. *Facadexs*. Building Maintenance Unit. Jewel of the Creek, Dubai. URL: <https://facadexs.com/References/jewel-of-the-creek-dubai/> (дата обращения: 14.04.2025).
12. *Permanent Suspended Access*. Building Maintenance Units, Monorails, Gantries. Secalt : Tractel Secalt, 2019. 15 p.

REFERENCES

1. *Key to access*. Facade and Glass Roof Access Systems. Espoo, Finland: ROSTEK OY, 2018. 19 p.
2. *Facade Access Systems*. Product Guide. Mammendorf, Germany: Manntech. Part of Alimak group, 2022. 39 p.
3. *Weismantle P., Thompson K., Torem E.* Facade Access and Maintenance for High-Rise Buildings: Technical Guide. CTBUH: CTBUH Facade Access Working Group, 2018. 117 p.
4. *Facade Access Design Guide*. Ver. 1.1. Singapore: Building and Construction Authority, 2019. 47 p.
5. *Building Maintenance Unit*. Köln, Germany: FBA Gomyl, 2017. 14 p.
6. *Hussain A.* Facade Access: Engineering Excellence Meets Architectural Challenges. Chennai, India: Notion Press, 2020. 240 p. ISBN 978-1649198631.

7. Replacing windows at hard-to-reach facade areas. Facadexs. Building Maintenance. Available: <https://facadexs.com/blog-replacing-windows-at-hard-to-reach-facade-areas/> (accessed April 14, 2025).
8. Jonathan E. Lewis, Stephen B. Schmitt, Gwenth R. Searer Design and Load Testing of Facade Access Equipment. Concrete Repair Bulletin. 2021. January/February. Pp. 20–24.
9. Nurhidayat Djoko. Setyanto Design a Suspended Access Equipment of Pakubuwono Spring Apartment. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2019; 14 (14): 3311–3316. ISSN 0973-4562.
10. BS EN 1808:2015. Safety Requirements for Suspended Access Equipment. Design Calculations, Stability Criteria, Construction. Brussels: BSI Standards Limited, 2015. 136 p. ISBN 978-0-580-72823-5.
11. Facadexs. Building maintenance unit. Jewel of the Creek, Dubai. Available: <https://facadexs.com/References/jewel-of-the-creek-dubai/> (accessed April 14, 2025).
12. Permanent Suspended Access. Building Maintenance Units, Monorails, Gantries. Secalt: Tractel Secalt, 2019. 15 p.

Сведения об авторах

Морицакова Людмила Дмитриевна, студентка, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лит. А, liudmilamorshakova@yandex.ru

Бардина Галина Андреевна, ст. преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лит. А, bardina_ga@spbstu.ru

Зацепина Александра Игоревна, ст. преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лит. А, Zatsepina.Aleksandra@yandex.ru

Authors details

Lyudmila D. Morshakova, Student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, liudmilamorshakova@yandex.ru

Galina A. Bardina, Senior Lecturer, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, bardina_ga@spbstu.ru

Alexandra I. Zatsepina, Senior Lecturer, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, Zatsepina.Aleksandra@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.05.2025
Одобрена после рецензирования 10.07.2025
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 27.05.2025
Approved after review 10.07.2025
Accepted for publication 26.06.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 206–220.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 206–220.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.072.2.042.8:534.014.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-206-220

EDN: MORLDB

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛОК ПРИ ОДНОКРАТНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

Андрей Владимирович Картопольцев

ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Спектральный анализ результатов свободных колебаний балок пролетных строений мостов относится к одному из основных классов инженерных задач, направленных на обеспечение точности в определении спектра собственных амплитудно-частотных характеристик и форм колебаний на их соответствие реальным условиям.

Цель работы: выявление погрешностей в воздействии ударных сил и изменения ускорения как случайных величин, а также анализ влияния погрешностей записанных акселерограмм колебаний в зависимости от типа инерционных импульсов.

Практическая значимость исследования состоит в проведении глубокого анализа трансформации входных возмущающих импульсов, вызванных ударным воздействием по методу Герца, и выходных реакций в виде комплексных спектров свободных колебаний балок. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов расчетов.

Ключевые слова: спектр, выборка, колебания, акселерограмма, импульс, амплитуда, случайный процесс

Для цитирования: Картопольцев А.В. Спектральный анализ свободных колебаний балок при однократном динамическом ударном воздействии подвиж-

ной нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 206–220. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-206-220. EDN: MORLDB

ORIGINAL ARTICLE

SPECTRAL ANALYSIS OF BEAM FREE VIBRATIONS UNDER ONE-TIME DYNAMIC LOAD**Andrei V. Kartopoltsev***ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia*

Abstract. The spectral analysis of free vibrations of bridge span beams is one of the significant engineering problems aimed at ensuring the accuracy in determining the spectrum of natural amplitude-frequency characteristics and vibration shape for their compliance with real conditions.

Purpose: Identification of errors in impact forces and changes in acceleration as random variables and the errors analysis in recorded accelerograms of vibrations, depending on the type of inertial pulses.

Practical implications: An in-depth analysis of transformation of input disturbing pulses from impact using the Hertz method and output reactions in the form of complex spectra of the beam free vibrations.

Keywords: spectrum, sampling, oscillations, accelerogram, impulse, amplitude, random process

For citation: Kartopol'tsev A.V. Spectral Analysis of Beam Free Vibrations under One-Time Dynamic Load. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 206–220. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-206-220. EDN: MORLDB

Уравнения динамики конструкции отличаются от статических уравнений тем, что в них содержатся инерционные члены от импульсного проявления при ударе, а внешние силы и компоненты напряженно-деформированного состояния являются функциями дополнительного аргумента времени t . Особенность и актуальность спектрального анализа собственных колебаний балок состоит в использовании асимптотического метода поведения частот и форм колебаний, например, в направлении точного вычисления средней плотности частот в выборке, а также применении метода волновых чисел с учетом вторичного эффекта инерции и деформации сдвига. При достаточно быстром изменении случайной ударной нагрузки во времени ее характерные периоды оказываются сопоставимыми с периодом собственных колебаний балки.

В этих условиях необходимыми являются исследования колебаний с учетом инерционного процесса, в частности удара по Герцу, представляющего собой случайный процесс. В качестве метода исследования случайных процессов в спектральном анализе предлагается использовать корреляционные методы, основанные на изучении связей между входными и выходными параметрами колебаний, т. к. значительная часть информации о случайном процессе собственных колебаний заключается в средних значениях и корреляционных функциях выборки спектра, подчиняющегося нормальному закону распределения плотностей вероятностей. Случайный процесс может быть упрощен, если он становится ква-

зистатическим и неизменным во времени и сближается с абстракцией реального процесса, т. к. все случайные нагрузки обладают свойством эргодичности, а также достаточно большой продолжительностью реализаций выборки колебаний и значительной информацией о статических свойствах процесса.

Для эргодических случайных процессов осреднение реализации выборки заменяется процессом осреднения по ансамблю реализации пиковых значений, осредненных по времени с помощью преобразования Фурье. Преобразования Фурье для стационарного эргодического случайного динамического процесса адекватны спектральной плотности корреляционной функции типа дельта-функция Дирака. Корреляционные функции и соответствующие им спектральные плотности удобны для описания выделяющихся пиков случайного процесса в выборке и являются прямыми анализаторами спектрального процесса. Спектральный анализ и определение спектральных характеристик свободных колебаний не является достаточным условием в решении задач. Поэтому необходимо найти совместное распределение вероятностей выходных параметров различной мощности (пиков) на протяжении выборки и осредненные числа пересечения заданного уровня в единицу времени, распределение экстремумов на заданном интервале времени [1].

При динамических испытаниях одиночным ударом груза по балке в ней возникают механические импульсы периодического и непериодического характера (рис. 1).

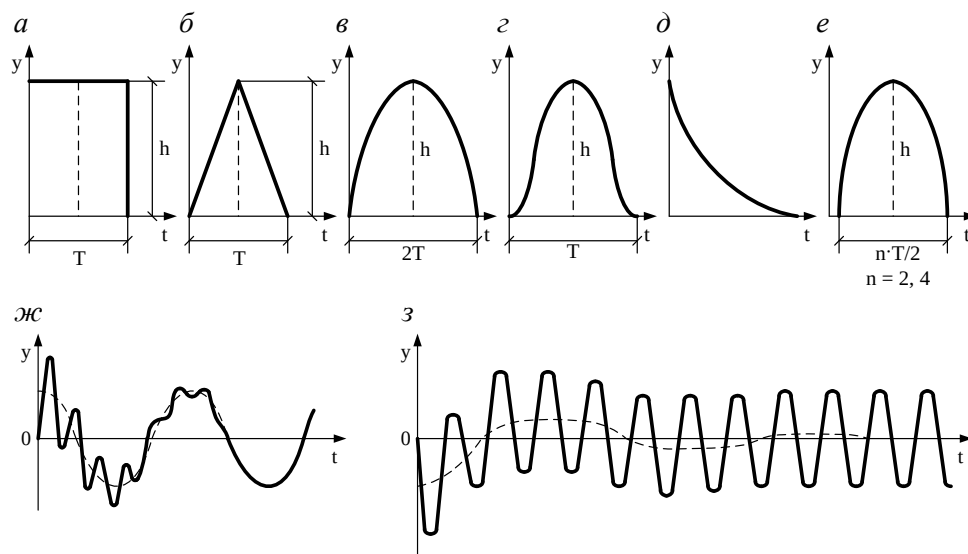


Рис. 1. Типовые формы ударных инерционных импульсов в методе Герца:

a – прямоугольный; b – треугольный; c – косинусоидальный с периодом $T = 2T$ и амплитудой $A_0 = h$; d – колокольный импульс; e – экспоненциальный; $ж$ – импульс в виде затухающей синусоиды; $з$ – импульс в форме отрезка синусоиды, состоящей из целого числа периодов $n = 2, 4$

Fig. 1. Typical waveforms of inertial pulses in the Hertz method:

a – rectangular; b – triangular; c – sinusoidal waveform with period $T = 2T$ and an amplitude $A_0 = h$; d – bell-shaped; e – exponential; $ж$ – damped sinusoid; $з$ – sinusoid segment consisting of the whole number of periods $n = 2, 4$

При периодических затухающих импульсах число n импульсов в единицу времени t равно обратной величине периода T , т. е. $\frac{1}{T} = n$, при этом частота импульсов собственных колебаний Θ_{p_0} [2] равна

$$\Theta_{p_0} = (1 - \frac{t}{T}) 100 \%, \quad (1)$$

где t – продолжительность соударения, с.

В некоторых случаях продолжительность импульса t принимается как промежуток времени между двумя одинаковыми значениями $\frac{g}{g_{\text{пик}}}$, где $g_{\text{пик}}$ – пиковое значение, или высота импульса (рис. 1). Например, для синусоидального импульса (рис. 1, е)

$$g_{\text{пик}} = g \frac{\cos p_0 \frac{T}{2}}{(1 - (\frac{2}{\pi} - p_0 \frac{1}{T}))^2}; \quad g = \frac{2}{\pi} h \cdot T;$$

$$t = n \frac{T}{2}; \quad n = 2h; \quad T = \frac{2\pi}{p_0}.$$

Ширина спектра импульса равна $\frac{1,5}{t}$.

Для прямоугольного импульса соответственно

$$t = \frac{T}{2}; \quad g = h \cdot T; \quad g_{\text{пик}} = g \frac{\sin p_0 \frac{T}{2}}{p_0 - \frac{T}{2}},$$

где h – высота импульса;

для треугольного импульса

$$g = h; \quad g_{\text{пик}} = g \frac{1 - \cos p_0 \frac{T}{2}}{\frac{1}{2}(p_0 \frac{T}{2})^2}.$$

Продолжительность импульса принимается в зависимости от вида удара и колебательного процесса в балке и рассматривается как случайный процесс, при котором значения, характеризующие колебания g_1, g_2, g_n в различные моменты времени t_1, t_2, t_n , являются случайными (рис. 2).

Для синусоидальной формы колебания функция затухания e^{-nt} выражает запаздывание начальной формы колебания смещением по фазе, равной ΔT , и выражение для g_a [3] имеет вид

$$\left. \begin{aligned} g_a &= g_0 \sin(p_0 \cdot t + \varphi_k); \\ g_a &= g_0 \cos(p_0 \cdot t + \varphi_k), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $p_0 \cdot t + \varphi_k$ – фазовый угол; φ_k – начальная фаза колебания $\approx \frac{\pi}{2}$, соответствует g_0 , равному $A_0 \sin(p_0 \cdot t + \varepsilon)$; ε – характеристическая функция распределения или фаза колебания.

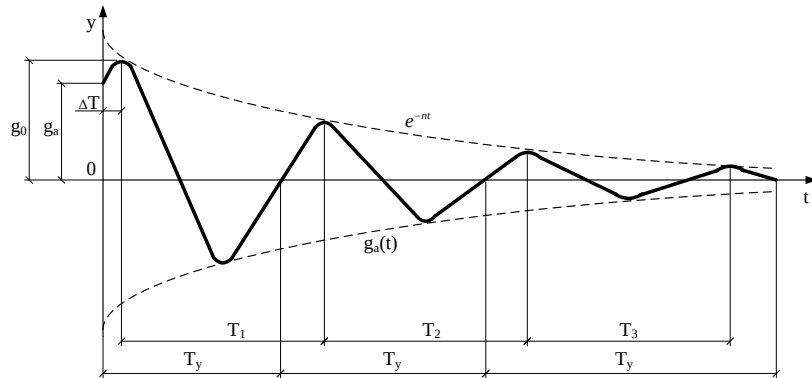


Рис. 2. Свободные синусоидальные колебания с переменной амплитудой

Fig. 2. Free sinusoidal vibrations with variable amplitude

Запишем условие

$$\sin p_0 \cdot t = \sin \frac{2\pi \cdot t_i}{T_i}; \quad \cos p_0 \cdot t = \cos \frac{2\pi \cdot t_i}{T_i}. \quad (3)$$

Из равенства $\frac{g_0}{p_0} = g_0 \cos \varepsilon$ определим ε :

$$\cos \varepsilon = \frac{1}{p_0}. \quad (4)$$

Для случайного колебательного процесса интегральная функция распределения вероятностей в момент времени t , $f(x, t)$ принимается на условиях осредненных амплитудных значений g_a (рис. 3).

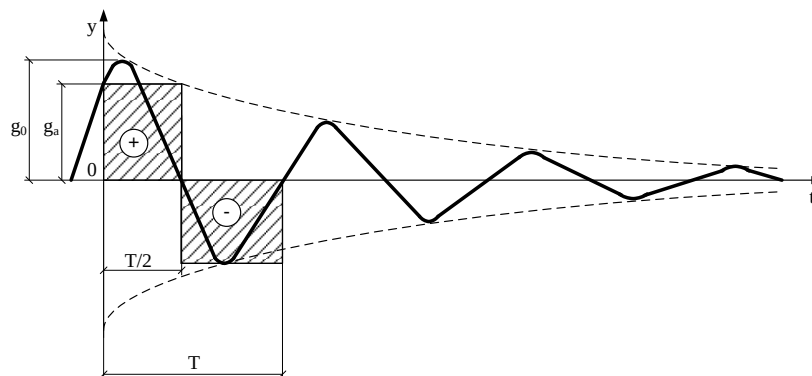


Рис. 3. График осреднения амплитудных значений синусоидальных колебаний

Fig. 3. Averaging of amplitude values of sinusoidal vibrations

Линеаризованная форма колебаний представляется формулой

$$g_a = \frac{2g_0}{\pi} = 0,636g_0. \quad (5)$$

Для гармонических стационарных колебаний формула (5) переписывается в виде

$$g_a = \frac{1}{\sqrt{2}} g_0 \approx 0,707g_0. \quad (6)$$

Для оценки вклада конкретного вида гармоник колебательного процесса используется коэффициент Ферли (Клир фактор), равный

$$K_{p_0} = \frac{\sqrt{p_{01}^2 + p_{02}^2 + \dots p_{0n}^2}}{p_{01} + p_{02} + \dots p_{0n}}, \quad (7)$$

где $p_{01}, p_{02} \dots p_{0n}$ – частота собственных колебаний рассматриваемых форм; K_{p_0} оценивает весовость и вклад частоты i -й гармоники в спектре колебаний по отношению к первой (определяющей) форме колебания. Спектральный состав формы случайных гармонических колебаний на частоте и фазе определяется из разложения в ряд интеграла Фурье:

$$g_a = g_0 \cos(p_0 \cdot t + \varphi_k) + a_0 \sin p_0 \cdot t, \quad (8)$$

где $a_0 = p_{0i} \cdot p_0 \cos \varphi_k$ – фазовый спектр; $\varphi_k = -\varphi_{p_0}$ – начальная фаза колебаний, в зависимости от вида импульса.

Тогда интегральная функция распределения вероятностей случайного процесса колебаний может быть представлена в виде

$$f(x_i t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos ix + b_i \sin ix), \quad (9)$$

где $b_i = p_0 \sin \varphi_k$ – амплитудно-фазовый спектр; $\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dy$; $f(x)$ – корреляционная функция [4].

Принимая условия, что величина усредненной амплитуды в спектре выборки пропорциональна полной энергии импульса, справедливо равенство

$$A_0 = g_0 = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)^2 dt, \quad (10)$$

где $f(t)$ – периодическая функция спектра, в зависимости от вида импульса.

Для экспоненциально-затухающей синусоиды колебания величина прогиба балки адекватна осредненному значению амплитуды A_0 , равной

$$Y(A_0) = e^{-p_0 t} \cdot g_0 \sin(p_0 \cdot t + \varphi_k), \quad (11)$$

где $p_0 = \frac{2\pi}{T}$, для первой формы $p_{01} = \frac{1}{T}$, для второй $p_{02} = \frac{2}{T}$, для третьей

$$p_{03} = \frac{3}{T}.$$

Периодическая функция $f(t)$ в виде ряда Фурье имеет вид

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot e^{2\pi k \cdot \frac{t}{T}}, \quad (12)$$

где k – коэффициент формы гармоники; $k = 1$ – первая форма гармоники, $k = 2$ – вторая форма гармоники, $k = 3$ – третья форма гармоники. Для осредненных величин $k = 1,11$, что характерно для полупериода колебания.

Прямая связь между спектральным разложением и поведением реальных механических систем основывается на определении спектра колебаний с использованием преобразований Фурье с интегрированием в бесконечных пределах. Спектральный анализ выступает как средство обработки и получения экспериментальных динамических характеристик свободных колебаний балок от ударного воздействия нагрузкой по методу Герца. Этот подход позволяет анализировать диапазон воздействия ударной силы и характер связей в момент соударения тел. Ударной силой будем называть силу, которая действует на балку в течение очень короткого промежутка времени t_y . В процессе ее действия величина силы сначала возрастает от нуля до весьма больших величин, а потом вновь уменьшается до нуля [5]. В момент проявления ударной силы вступают во взаимодействие связи, которые и формируют алгоритм спектрального анализа. Например, учет кинетической энергии потерянных скоростей может быть выполнен по теории Карно [6].

Спектральный анализ амплитудно-частотных характеристик свободных колебаний балок удобно проводить с применением методов искусственной периодизации. Ударное воздействие по Герцу и вызываемые им колебания рассматриваются как непериодический однократный процесс, случайный по своей природе, характеристики которого нельзя точно предвидеть. Численные методы амплитудно-частотного спектрального анализа свободных колебаний всегда были и остаются трудоемкими, особенно в случае непериодических колебаний с разложением временных рядов Фурье по спектральным составляющим с помощью полосовой цифровой фильтрации [7]. Это позволяет исследовать закономерности формирования колебательного процесса, определять спектр генерации собственных колебаний, а также оценивать фазу и модули взаимного спектра, функции когерентности спектра мощности записанных временных рядов Фурье.

Характеристики и частоты собственных колебаний могут оцениваться уровнем половинной мощности спектральных пиков выборки [8]. Методом экспресс-анализа удастся вычислить спектр сигнала любого участка выборки, выполнить цифровую фильтрацию (полосу низких и высоких частот) выборки, оценить динамику спектрального состава, а также мгновенные спектры колебаний с использованием искусственной периодизации. Корреляция в спектральном анализе одной выборки записи колебания используется на протяжении одного сегмента обработки выборки и выбирается исходя из заданных условий (рис. 4, а):

$$T_s \geq \frac{4\pi}{\varepsilon_{c \min}}, \quad (13)$$

m_p и m_δ – приведенная масса соответственно нагрузки и балки; I – момент инерции; $\ln \delta$ – логарифмический декремент затухания, равный $\ln \frac{A_0}{A_i} - \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}$, A_i – амплитуда i -го периода колебания, t – продолжительность импульса колебания.

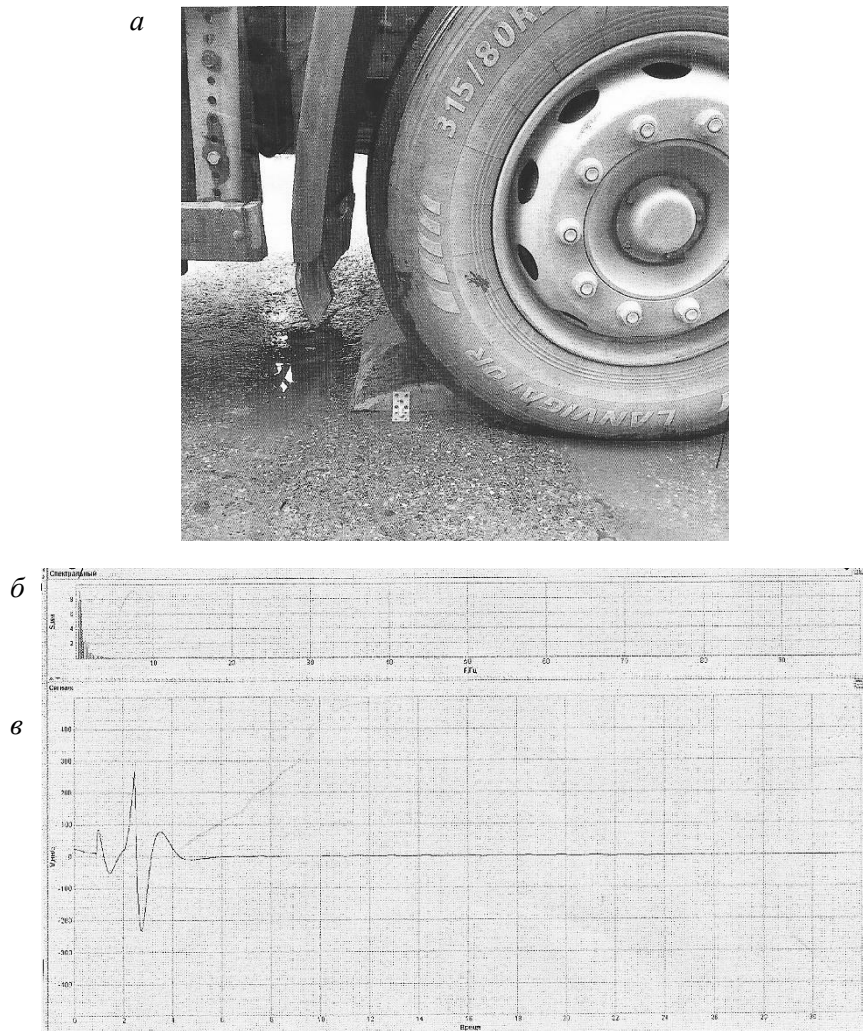


Рис. 5. Динамическое нагружение ударом одиночного автомобиля:

a – общий вид удара; b – спектр частот при въезде на балку; c – спектр частот ударного воздействия при $x = 1,0$

Fig. 5. Dynamic load from one vehicle:

a – general view of impact; b – frequency spectrum when entering the beam; c – frequency spectrum at $x = 1.0$

При соударении тел по методу Герца учитывается инерционное увеличение амплитуды A_i за счет диссипации. Тогда логарифмический декремент затухания $\ln \delta$ будет равен

$$\left. \begin{aligned} \ln \delta &= \frac{\pi - \eta}{Y_1 - \frac{\eta_2}{4}} - \text{по С. Крэнделлу} \\ \text{или} \\ \ln \delta &= \frac{\pi \cdot E}{\eta_1 \cdot p_0} - \text{по Г. Кольскому,} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где η – коэффициент инерционного увеличения амплитуды A_i свободных колебаний за счет диссипации [12]; η_1 – коэффициент диссипации = 0,01.

В стадии численного анализа виброграмм свободных колебаний (рис. 5, б, в) величина логарифмического декремента затухания равна $1,7 \cdot 10^{-3}$, тогда как при спектральном анализе его величина составляет $\pi \frac{\Delta p_0}{p_0}$, где Δp_0 – ширина

спектра частот свободного колебания на уровне максимума спектральной плотности и ширине спектра амплитуд выборки, определяемой в зависимости от вида импульса: для синусоидального $\Delta f = \frac{1}{t}$, для треугольного $\Delta f = \frac{2}{t}$.

Спектральная частота собственных колебаний p_0 определяется исходя из формы колебаний в виде

$$Y = 0,58 \sin \frac{\pi \cdot x}{l}, \quad (16)$$

где 0,58 – коэффициент, введенный для сопоставления результатов точного и приближенного спектральных методов [13]; l – длина балки.

Первая, основная, частота собственных колебаний определяется из выражения

$$p_{01} = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (17)$$

где m – приведенная масса груза и балки.

Независимо от вида удара, частота собственных колебаний при численном анализе одинакова, тогда как при спектральном анализе обнаружено расхождение в значениях: при упругом ударе частота собственных колебаний составила 2,86 Гц (период 0,350 с) с доверительным интервалом $\pm 0,15$ Гц и $\pm 0,0017$ с, а при неупругом ударе частота собственных колебаний равна 2,974 Гц (период 0,336 с). Расхождение составило 4,5 %. Коэффициент затухания ε , определенный по полуширине спектрального пика выборки на промежутке $(t_0 - t_1)$, соответствующем полному периоду собственных колебаний, равен

$$\varepsilon = \frac{1}{t_1 - t_0} \ln [A_i(t_i) - A(t_0)], \quad (18)$$

где $A(t_i)$ – среднее значение амплитуды между начальным и конечным элементами времени выбранного диапазона (момент времени $t = t_0$ и $t = t_1$).

Спектральный анализ отдельных участков выборки колебаний позволяет оценить динамику спектра колебаний балки с учетом их спектральной плотно-

сти. Например, при одиночном ударе по пролетному строению моста теоретически рассчитанная частота собственных колебаний составила $p_0 = 3,0$ Гц, $T_c = 0,333$ с, тогда как спектральный анализ виброграмм показал значения $p_0^3 = 2,94$ Гц, $T_c^3 = 0,3$ с, коэффициент затухания $0,1 \text{ с}^{-1} \leq \varepsilon \leq 0,18 \text{ с}^{-1}$, логарифмический декремент $\ln \delta = 0,046$ [14]. На рис. 6 приведены спектральные плотности характеристик участков виброграмм спектрального анализа.

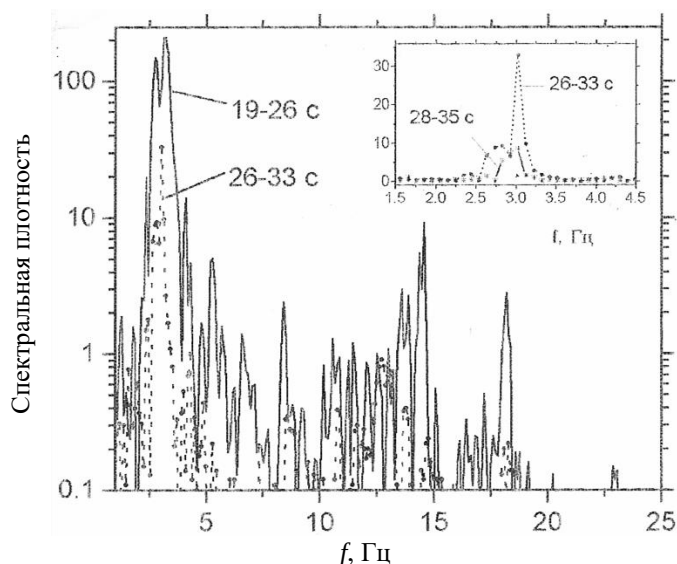


Рис. 6. Спектральные плотности частотных колебаний

Fig. 6. Spectral density of frequency modes

Таким образом, весь процесс спектрального анализа виброграмм и осциллограмм колебаний балок пролетных строений мостов основан на амплитудно-временном преобразовании исходных выборок. Методика включает интегрирование и дифференцирование исходных данных с учетом результатов записывающих и регистрирующих вибрационных преобразователей, вычисление частотного спектра выбранного участка реализации с использованием преобразований Фурье и Лапласа. Преобразование Лапласа, связывающее функции комплексного переменного (изображение) с функцией вещественного переменного (оригинала), в ряде случаев оказывается более удобным, чем преобразование Фурье [15, 16]. В процессе центрирования сигналов и спектральной обработки используются окна Хеминга и Хана, а их полуширина выбирается как часть от количества точек в спектре выборки. В отличие от интеграла Фурье, где функция $f(t)$ представляется суммой бесконечно большого числа элементарных гармонических колебаний, для преобразования Лапласа функция $f(t)$ представляется суммой бесконечно большого числа элементарных колебаний, убывающих по экспоненциальному закону:

$$f(t) = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{\sigma-\infty}^{\sigma+\infty} F(p) l^m \cdot dp \right), \quad (19)$$

где $p = i \cdot p_0$; $F(p)$ – изображение; i – выбранный вид гармоники; p_0 – частота собственных колебаний i -й формы гармоники колебаний.

В алгоритме расчета взаимного спектра выборки (+ или –) в преобразовании Фурье вводится корреляционная функция двух переменных $x(t)$ и $y(t)$. Корреляция – это эргодический стационарный процесс усреднения при вычислении спектра случайных величин выборки. Случайный процесс выборки при колебаниях представляется как функция $\xi(\Theta, t)$ двух переменных: случайный параметр $\Theta = p_0$ и непрерывный текущий параметр $t = t_1$. При $t = t_0$ определяемое усреднение есть не что иное, как операция интегрирования, например, для определения среднего времени выборки $t = t_1 = t_{cp}$ справедливо выражение вида

$$\xi(t_1 = t_{cp}) = \frac{1}{T} \int_{\Theta}^{\frac{T}{2}} \xi(t_1) dt. \quad (20)$$

Средняя функция корреляции и средний спектр выборки связаны между собой преобразованием Фурье в виде

$$S_{t(p_0)} = \int_{t=0}^{t_{cp}} \xi(t_{cp}) e^{-p_0 \cdot t_{cp}} dt_{cp}. \quad (21)$$

Проведя усреднение по времени, получим связь между средним спектром и средней функцией корреляции. Произведение $S_{t(p_0)} d p_0$ представляет собой элементарную спектральную плотность дисперсии частот на участке выборки, соответствующей элементарному отрезку $d p_0$ по оси частот (см. рис. 6). По величине спектральной плотности дисперсии выборки определяем истинную корреляционную функцию случайного процесса колебания. Таким образом, спектральная плотность дисперсии $S_{t(p_0)}$ аналогична спектральной энергетической мощности исследуемой выборки колебания (рис. 7).

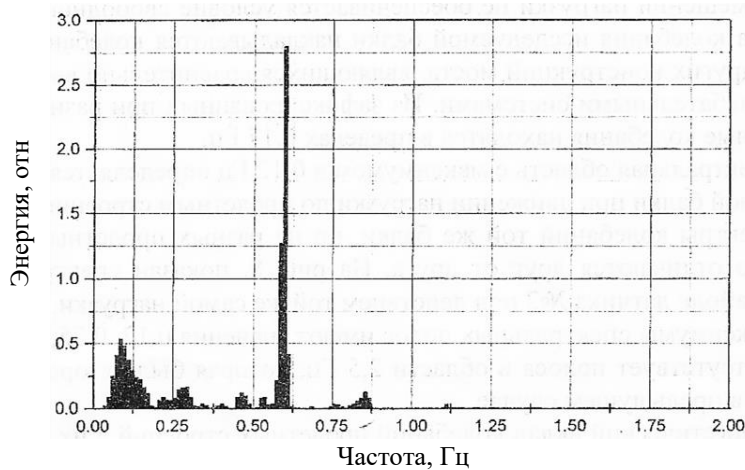


Рис. 7. Энергетический спектр мощности выборки без учета инерционности массы балки
Fig. 7. Energy spectrum of sampling regardless of the beam mass inertness

В этом случае энергетическая мощность спектра выборки выражается отношением

$$\frac{S_{t(p_0)}}{t_1} = \frac{S_{t(p_0)}}{T}. \quad (22)$$

Отношение (22) приближает к нормированию характеристик случайного процесса. Разделив корреляционную функцию $f(t)$ и спектральную плотность $S_{t(p_0)}$ на дисперсию, получаем показатель нормированной корреляционной функции в виде коэффициента корреляции случайного процесса от 0 до ± 1 в зависимости от продолжительности интервала корреляции t . Выражение для $S_{t(p_0)}$ спектральной плотности частотных значений выборки включает область отрицательных и положительных частот. Интегральное преобразование $S_{t(p_0)}$ [17] при значении

$$A_0 = 2\alpha \left[\frac{1}{\alpha^2 (\beta - p_0)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + (\beta + p_0)^2} \right]$$

будет иметь вид

$$S_{t(p_0)} = \frac{\alpha}{\pi} A_1 \cdot x \frac{p_0^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(p_0^2 - \beta^2 - \alpha^2) + 4\alpha^2 p_0^2}, \quad (23)$$

где $\alpha = 1$; $\beta = 2,5$ – для синусоидальной формы колебания с импульсом типа, показанного на рис. 1, г. Для положительных частот выражение (23) имеет вид

$$S_{t(p_0)} = \frac{2\alpha}{\pi} A_1 \cdot x \frac{p_0^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(p_0^2 - \beta^2 - \alpha^2) + 4\alpha^2 p_0^2}. \quad (24)$$

Распределение плотностей вероятностей с помощью дельта-функции Дирака позволяет выделить одиночный импульс выборки с характеристиками

$$p_0 = \frac{2\pi}{T} \text{ и } S_{t(p_0)} \text{ в виде}$$

$$S_{t(p_0)} = T \frac{\sin p_0 \frac{T}{2}}{p_0 \frac{T}{2}}. \quad (25)$$

Выводы

Исследование закономерности формирования колебательного процесса ударным воздействием по методу Герца основано на определении спектра генерации амплитудно-частотных характеристик собственных колебаний, фазовых соотношений и модулей взаимного спектра, а также функции когерентности спектра энергетической мощности. Предложенный метод позволяет анализировать выборки с использованием преобразований Фурье и Лапласа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов // Успехи физических наук. 1962. Т. 77. № 3. С. 70–73.
2. Иорш Ю.И. Виброметрия. Москва : Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1963. 756 с.
3. Шиманский Ю.А. Динамический расчет судовых конструкций. Ленинград : Государственное изд-во судостроительной литературы, 1948. 407 с.
4. Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В. Техническая вибродиагностика пролетных строений мостов // Акустика речи, медицинская и биологическая акустика, архитектурная и строительная акустика, шумы и вибрации, аэроакустика : сб. трудов XX сессии Российского акустического общества. Том 3. Москва : ГЕОС, 2008. С. 228–233.
5. Мак-Миллан В.Д. Динамика твердого тела. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1951. 467 с.
6. Анпель П. Теоретическая механика. Том II. Москва : Государственное изд-во физико-математической литературы, 1960. 487 с.
7. Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. Москва : Машиностроение, 1969. 247 с.
8. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Москва : Физматгаз, 1962. 249 с.
9. Кренделл С. Случайные колебания. Москва : Мир, 1967. 356 с.
10. Гусев С.К. К анализу выбросов случайных функций // Известия вузов. Машиностроение. 1967. № 3. С. 27–30.
11. Хазанов М.Л. Методика анализа результатов динамических испытаний мостовых сооружений // Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 3. С. 26–28.
12. Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д., Зголич М.В. К вопросу о диссипативности деформирования балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2. С. 194–199.
13. Кан С.Н., Цветков А.В. Определение собственных частот поперечных колебаний прямых стержней при сложных граничных условиях // Новые облегченные конструкции зданий : межв. сб. статей. Ростов-на Дону, 1982. С. 92–98.
14. Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В. Автоматизация мониторинга вибрационных характеристик пролетных строений автодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2003. № 1. С. 161–167.
15. Paltre P., Proulx J. Structure testing of large – Seale Structures // Structural Engineering International. 1997. V. 7. № 1. P. 29–34.
16. Патент № 2284489 Российская Федерация, МПК G01M 7/02 (2006.01). Способ вибрационного контроля технического состояния пролетных строений мостовых конструкций : № 2005109688/28 : заявл. 04.04.2005 : опубл. 27.09.2006 / Селиванова Т.В., Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В. Государственный реестр изобретений Российской Федерации, 2005.
17. Spliner L.M. Errors in power spectra due to finite sample // J.Appl. phys. 1954. V. 25. № 5. P. 653–659.

REFERENCES

1. Tikhonov V.I. Emissions of Random Processes. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 1962; 77 (3): 70–73. (In Russian)
2. Iorish Yu.I. Vibrometry. Moscow: Mashinostroenie, 1963. 756 p. (In Russian)
3. Shimansky Yu.A. Dynamic Calculation of Ship Structures. Leningrad: Sudostroenie. 1948. 407 p. (In Russian)
4. Bochkarev N.N., Kartopol'tsev A.V. Technical Vibration Diagnostics of Bridge Spans. In: *Proc. 20th session of the Russian Acoustical Society "Speech, Medical and Biological, Architectural and Building Acoustics, Noise and Vibration, Aeroacoustics"*, vol. 3, Moscow: GEOS, 2008, Pp. 228–233. (In Russian)
5. Macmillan W.D. Dynamics of Rigid Bodies. Moscow: Foreign Literature Publishing House. 1951. 467 p. (Russian translation)
6. Appel P. Theoretical Mechanics. Vol. T. II. Moscow: Fizmatlit, 1960. 487 p. (In Russian)

7. Batuev G.S., Golubkov Yu.V., Efremov A.K., Fedosov A.A. Engineering Methods in Studying Impact Processes. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 247 p. (In Russian)
8. Kharkevich A.A. Spectra and Analysis. Moscow: Fizmatgaz, 1962. 249 p. (In Russian)
9. Krendell S. (Ed.) Random Oscillations. Moscow: Mir, 1967. 356 p. (Russian translation)
10. Gusev S.K. On the Analysis of Outliers of Random Functions. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 1967; (3): 27–30 (In Russian)
11. Khazanov M.L. Analysis of dynamic test results of bridge structures. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2007; (3): 26–28. (In Russian)
12. Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D., Zgolich M.V. Dissipative Deformation of Bridge Span Beams. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; (2): 194–199. (In Russian)
13. Kan S.N., Tsvetkov A.V. Determination of natural frequencies of transverse vibrations of straight rods under complex boundary conditions. In: Cool. Papers 'New Lightweight Building Structures', Rostov-on-Don, 1982, Pp. 92–98. (In Russian)
14. Bochkarev N.I., Kartopoltsev A.V. Automation of Monitoring Vibration Characteristics of Road Bridge Spans. *Vestnik of State University of Architecture and Building*. 2003; (1): 161–167. (In Russian)
15. Paultre P., Proulx J. Dynamic Testing of Large-Scale Structures. *Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering*. 1997; 1/97: 29–34.
16. Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V. Vibration Monitoring of Technical Condition of Bridge Spans. Patent Russ. Fed. No. 228448, 2005. (In Russian)
17. Spetner L.M. Errors in Power Spectra due to Finite Sample. *Journal of Applied Physics*. 1954; 25 (5): 653–659.

Сведения об авторе

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Author Details

Andrey V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО "DIAMOS", 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 221–232.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 221–232.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.73

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-221-232

EDN: LVBLVK

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА УЧАСТКАХ С АВТОМАТИЧЕСКИМИ ПУНКТАМИ ВЕСОГАБАРИТНОГО КОНТРОЛЯ

**Сергей Васильевич Алексиков, Андрей Иванович Лескин,
Дмитрий Иванович Гофман, Лейла Муаз Лескина,
Сергей Николаевич Бормотов**

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Надежность и точность взвешивания движущегося транспортного средства на автоматических пунктах весового и габаритного контроля (АПВГК) зависят от транспортно-эксплуатационных характеристик проезжей части. Опыт применения автоматизированных комплексов на дорогах регионального значения выявил существенные недостатки в точности взвешивания, обусловленные низкими требованиями к ровности и прочности дорожного полотна в местах их размещения. Неровности дороги вызывают дополнительные динамические нагрузки на дорожное полотно и датчики весоизмерительного оборудования. Образование колеи провоцирует поперечные колебания грузового транспорта, что критически недопустимо в зоне автоматического весового и габаритного контроля транспортных средств и снижает достоверность результатов взвешивания. Анализ данных о нарушениях, зарегистрированных в Волгоградской области, показал, что около 10 % грузовых транспортных средств, передвигающихся по региональным автомобильным дорогам, превышают допустимую массу на 20 %. Это приводит к ускоренному износу дорожного покрытия и образованию дефектов. Для гарантии нормативной точности измерений и правильной работы датчиков на протяжении пятилетнего периода необходимо повысить требования к данным характеристикам дорожного покрытия.

Цель исследования заключается в обосновании требований к дорожному покрытию в месте расположения АПВГК и на подходах к ним с учетом особенностей функционирования весоизмерительного оборудования.

Методы исследования включали анализ фактического состояния дорожного покрытия, оценку воздействия подвижной колесной нагрузки на весовые датчики, а также расчет минимально допустимых значений модуля упругости, глубины колеи и продольной ровности дорожного покрытия. Исследования проводились с учетом технических характеристик датчиков и требований к их сохранности при эксплуатации.

Результаты. На основе исследований воздействия подвижной колесной нагрузки на весовые датчики, вмонтированные в дорожное покрытие, обоснованы максимальная глубина колеи, модуль упругости конструкции дорожной одежды и предъявлены требования к допустимой продольной ровности проезжей части в месте расположения АПВГК и на прилегающих к ним участках автомобильной дороги. Показано, что сохранность датчика обеспечивается при модуле упругости на дне штрабы под датчиком не менее 325 МПа.

Допустимый модуль упругости дорожных одежд зависит от технической категории дороги и должен быть на 30 % выше прочности конструкции для дорог общего пользования.

Ключевые слова: ровность, модуль упругости, колея, дорожная одежда, погрешность, весогабаритный контроль, весоизмерительный датчик, осевая нагрузка, проезжая часть, покрытие

Для цитирования: Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И., Лескина Л.М., Бормотов С.Н. Обоснование требований к проезжей части автомобильных дорог на участках с автоматическими пунктами весогабаритного контроля // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 221–232. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-221-232. EDN: LVBLVK

ORIGINAL ARTICLE

LEGAL BASIS FOR TRAFFICWAY REQUIREMENTS AT WEIGHT-IN-MOTION CONTROL SYSTEM POINTS

Sergey V. Aleksikov, Andrey I. Leskin, Dmitry I. Gofman,
Leyla M. Leskina, Sergey N. Bormotov

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. Reliability and accuracy of weighing a moving vehicle by automatic weight-in-motion (WIM) control systems depend on transport and trafficway performance. The experience in using WIM control systems on regional roads shows significant shortcomings in weighing accuracy due to low requirements for smoothness and structural strength of pavement in places of their location. Road irregularities cause additional dynamic loads on the road pavement and weighing sensors. The formation of ruts provokes lateral vibration of trucks, which is critically unacceptable in the area of WIM control system points and reduces the reliability of weighing results. The data analysis of violations registered in the Volgograd Region shows that about 10 % of trucks moving on regional highways exceed the permissible weight by 20 %. This leads to accelerated wear of the road pavement and defect formation.

Purpose: Substantiation of requirements for road pavements at WIM control system points and on approaches to them with regard to operation of the weighing equipment.

Methodology/approach: The analysis of actual conditions of the road pavement, assessment of the live load on the weight sensors, calculation of the minimum permissible values of the elastic modulus, rut depth and longitudinal evenness. Investigations are carried out with respect to sensor specifications and requirements for their operational safety.

Research findings: The maximum rut depth, elastic modulus of the road surface are substantiated, and requirements are presented for the permissible longitudinal evenness at WIM control system points and on adjacent road sections.

Keywords: smoothness, elastic modulus, track, road pavement, error, weight and dimension control, weighing sensor, axle load

For citation: Aleksikov S.V., Leskin A.I., Gofman D.I., Leskina L.M., Bormotov S.N. Legal Basis for Trafficway Requirements at Weight-in-Motion Control System Points. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 221–232. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-221-232. EDN: LVBLVK

Введение

В Волгоградской области успешно завершается реализация национального проекта «Безопасные качественные дороги», согласно которому к 2024 г.

было отремонтировано более 300 км дорог с объемом финансирования, превышающим 11 млрд руб. Сеть дорог городских агломераций, отвечающая нормативным показателям, достигла 85 %. Однако наряду с ремонтом и строительством новых дорог остро стоит проблема обеспечения их сохранности, в том числе в весенний расчетный и летний жаркий периоды года, путем ограничения движения тяжеловесного грузового автотранспорта. Согласно данным весового контроля Российской Федерации, до 40 % грузоперевозчиков нарушают установленные нормы по массе и/или осевым нагрузкам автомобиля. Средний перевес транспортных средств (ТС), как правило, достигает 50 %, что усиливает разрушающий эффект на покрытия в 5,06 раза и сокращает срок его службы по критерию усталостной трещиностойкости до 23 % [1].

Мировой и отечественный опыт внедрения систем контроля за перегрузом показал, что наиболее эффективным способом борьбы с ним является весовой контроль движущихся ТС системами Weigh-in-Motion (WIM) на специально оборудованных автоматических пунктах весогабаритного контроля. Основой WIM-систем являются вмонтированные в покрытие поперек полосы движения весоизмерительные датчики, позволяющие фиксировать транспортные нагрузки при скорости движения транспортных средств до 150 км/ч [2–5].

Объекты исследования

На территории Волгоградской области к 2022 г. размещено 8 пунктов весогабаритного контроля на автомобильных дорогах федерального, регионального или межмуниципального, местного значения (рис. 1):

- 1) 18 ОП РЗ 18К-7 – «Новониколаевский – Урюпинск – Нехаевская – Краснополье – Манино (Воронежская область)» (в границах территории Волгоградской области;
- 2) 18 ОП РЗ 18А-2 – «Михайловка (км 15) – Серафимович – Суровикино»;
- 3) 18 ОП РЗ 18К-1 – «Волгоград – Октябрьский – Котельниково – Зимовники – Сальск» (в границах территории Волгоградской области);
- 4) 00 ОП ФЗ Р-260 – Р-260 «Волгоград – Каменск-Шахтинский – Луганск» (лево);
- 5) 00 ОП ФЗ Р-260 – Р-260 «Волгоград – Каменск-Шахтинский – Луганск» (право);
- 6) 18 ОП РЗ 18Р-0 – «Первый пусковой комплекс первой очереди мостового перехода через р. Волгу в г. Волгограде»;
- 7) 18 401 ОП МГ А – «3-я Продольная магистраль»;
- 8) 18 ОП РЗ 18Р-01 – «Мостовой комплекс Волжской ГЭС».

Практика эксплуатации АПВГК показала, что недолговечность весоизмерительных датчиков и ошибки весового контроля до 40 % обусловлены следующими причинами [6–10]:

– низкая продольная ровность и колейность проезжей части в зоне автоматического весового и габаритного контроля транспортных средств (АВГК), которые приводят к ускоренному износу датчиков, раскачиванию грузовых автомобилей в продольном и поперечном направлениях;

– различная жесткость дорожного покрытия и конструкций датчиков, что приводит к выкрашиванию покрытия и образованию уступов в зоне датчиков и, как следствие, к увеличению динамических (ударных) нагрузок на датчики.

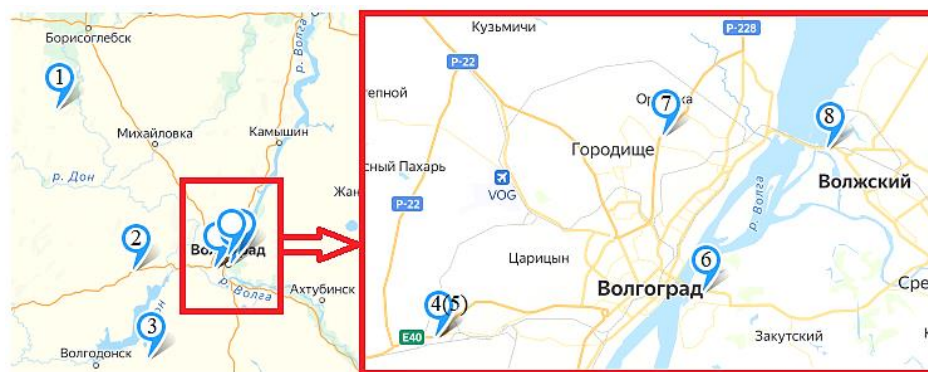


Рис. 1. Места расположения АПВГК в Волгоградской области (на основе Яндекс Карт)

Fig. 1. WIM control system locations in the Volgograd region

Исходя из вышеизложенного, в соответствии с требованиями производителей датчиков¹ [11, 12] размещаемое оборудование должно соответствовать установленным ими требованиям:

- точная работа при перепаде температур в течение года от минус 40 °С до плюс 50 °С;
- точность измерений при дневном перепаде температур > 20 °С;
- необходимость в повторной калибровке не более 1 раза в год;
- нормативный срок службы датчиков от 2 до 5 лет;
- повышенная ровность покрытия перед датчиками для исключения колебаний подвески транспортных средств;
- дорожное покрытие должно быть жестким с модулем упругости не менее 500 МПа, чтобы калибровочные коэффициенты оставались стабильными, несмотря на большие перепады температур в течение года и суток.

Проведенный анализ справочной, научной и технической литературы позволяет сделать вывод о предъявлении повышенных требований к проезжей части автомобильных дорог на участках размещения автоматических пунктов весогабаритного контроля, особенно к таким, как продольная и поперечная ровность (колейность) и прочность [11–14]. В связи с этим сформулированы основная цель и задачи настоящего исследования.

Цели и задачи исследования

Цель исследования – обоснование требований к дорожному покрытию в месте расположения АПВГК и на подходах к ним. В основе данного исследования лежат следующие задачи:

- оценка фактического и обоснование минимально требуемого модуля упругости дорожного покрытия в зоне расположения АПВГК;
- обоснование допустимой колеиности и продольной ровности дорожного покрытия как на подходах к АПВГК, так и в зоне проведения измерений.

¹ Information letter from Kistler Group. No. 22-09-061 dated 09/21/2022; Guide to technological preparation // Kistler.com. URL: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/lineas-compact-quartz-sensors-weight-in-motion-9196a/P0000646>, 2019. 35 p. (accessed 03/20/2025).

Результаты и обсуждение

Обоснование требований к дорожному покрытию выполнено на основе исследований АПВГК, размещенных на дорогах «Волгоград – Октябрьский – Котельниково – Зимовники – Сальск» (в границах территории Волгоградской области) (рис. 2); «Михайловка (км 15) – Серафимович – Суровикино»; «Ново-николаевский – Урюпинск – Нехаевская – Краснополье – Манино (Воронежская область)» (в границах территории Волгоградской области).



Рис. 2. АПВГК на дороге «Волгоград – Октябрьский – Котельниково – Зимовники – Сальск» (в границах территории Волгоградской области)

Fig. 2. WIM control system on the Volgograd – Oktyabrsky – Kotelnikovo – Zimovniki – Salsk road (in the Volgograd Region)

На объектах было установлено оборудование измерительной системы WIM KISTLER, которая предъявляет следующие требования к дорогам:

- модуль упругости покрытия не менее 500 МПа;
- колейность дорожного покрытия при установке датчиков < 3 мм;
- индекс ровности покрытия IRI (International Roughness Index) $< 2,6$ м/км (на участке длиной 40 см перед датчиком и после него неровность дорожного покрытия не должна превышать 1–2 мм);
- дорожное покрытие не должно иметь трещин и выбоин [8–13].

В процессе оценки транспортно-эксплуатационных показателей дорожного покрытия в зоне контроля и на подходах к ней (100 м до и 50 м после) были проведены в соответствии с действующими нормативными документами измерения уклонов, колейности, модуля упругости, дефектов и физико-механических свойств асфальтобетонных вырубков, отобранных из покрытия.

Установлено несоответствие полученных данных требованиям компании KISTLER. Продольная ровность (индекс IRI) до 4,8 м/км превышает допустимое значение 2,6 м/км. Модуль упругости (с надежностью 90 %) 337 МПа меньше допустимого 500 МПа. На основании технического отчета по нарушениям, зафиксированным комплексами фотофиксации административных правонарушений «Архимед», эксплуатируемыми на территории Волгоградской области, установлено, что 10 % грузовых автомобилей на региональных доро-

гах имеют перегруз до 20 %. Вследствие движения перегруженных ТС по неровному покрытию с недостаточной прочностью в зоне датчиков зафиксированы дефекты в виде трещин, выбоин, выкрашивания и колеи (рис. 3).



Рис. 3. Дефекты проезжей части в зоне весоизмерительных датчиков
Fig. 3. Defects of the road pavement nearby weighing sensors

По причине недостаточной прочности дорожного покрытия на подъездах к месту расположения датчиков произошло образование колеи, которая способствовала поперечному раскачиванию грузовых автомобилей и снижало точность измерений веса ТС до 40 %. Одной из основных причин низкой точности взвешивания в системах WIM являются процессы, возникающие в комплексе «дорожное покрытие – датчик – нагрузки» как от воздействия изменений температуры дорожного покрытия, так и от возрастания транспортной нагрузки. Кроме того, в колее образуется вертикальный порог, создаваемый корпусом датчика и возвышающийся над низом колеи, что приводит к росту ударной нагрузки на корпус датчика до 30 % и его дальнейшему разрушению при проезде тяжеловесного автомобиля (рис. 4).



Рис. 4. Разрушение покрытия и весоизмерительного датчика
Fig. 4. Pavement and weighing sensor destruction

Прочность проезжей части является главным параметром, определяющим формирование продольной (IRI) и поперечной ровности (колеяности) покрытия. При обосновании требований к проезжей части необходимо учитывать конструктивные особенности WIM-датчиков в покрытии (рис. 5) [15–17].

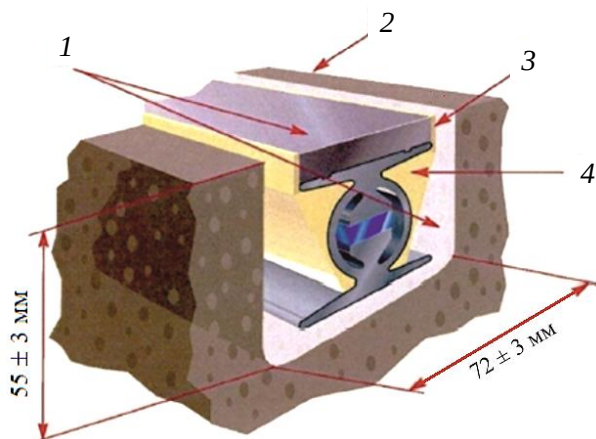


Рис. 5. Конструкция WIM-датчика и схема его установки в покрытие²:

1 – песко/цементно-эпоксидный раствор; 2 – дорожное покрытие; 3 – пена-полоса;
4 – пена

Fig. 5. WIM sensor and its schematic installation in the pavement:

1 – sand/cement-epoxy mortar; 2 – road surface; 3 – foam strip; 4 – foam

WIM-датчик устанавливается в подготовленную в дорожном покрытии штрабу с размером по глубине 50–70 мм, по ширине 70–100 мм, по длине 500–2000 мм [1, 10]. Полимерный слой толщиной 7–10 мм, нанесенный сверху на поверхность корпуса датчика и непосредственно контактирующий с колесом транспортного средства, выполняет защитную функцию, предотвращая его преждевременный износ.

Требования к точности взвешивания ТС WIM-системами в Российской Федерации установлены постановлением Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 г. № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» в пределах 5 % для общей массы ТС и 11 % для нагрузок на ось, и на момент ввода в эксплуатацию допустимые погрешности должны быть уменьшены в 2 раза [10]. Ухудшение продольной ровности покрытия (IRI) приводит к росту амплитуды вынужденных колебаний кузова автомобиля (раскачивания), которая может в 1,5 раза превышать высоту или глубину неровности и зависит от жесткости подвески ТС и возмущающего усилия на колесо.

Поскольку измерение продольной ровности покрытий производится по международному индексу ровности IRI, важно провести анализ влияния данного показателя на ошибку измерения осевой нагрузки. В исследованиях [1, 10]

² URL: https://rosdornii.ru/upload/iblock/f4d/hxrn89adpl4o1odfphyfhz90l43f1r1l/10_ISSLEDOVANIIE_SVOYSTV_MATERIALA_DLYA_FIKSATSII_V_DOROZHNYKH_POKRYTIYAKH_DATCHIKOV_DLYA_DINAMICHESKOGO_VZVESHIVANIYA.pdf

была установлена зависимость между значениями IRI и погрешностью взвешивания (Π , %) в пределах 1–6 м/км:

$$\Pi = 0,125 \cdot \text{IRI}^2 + 1,5536 \cdot \text{IRI} + 2. \quad (1)$$

Согласно установленным требованиям к точности определения осевой нагрузки, индекс IRI для эксплуатируемых АПВГК не должен превышать 3,92 м/км к концу срока службы датчиков, а при вводе АПВГК в эксплуатацию значение IRI должно быть установлено согласно требованиям к точности датчика при первичной поверке. Согласно формуле (1), допустимое начальное значение $\text{IRI} < 1,9$ м/км для всех дорожных покрытий и технических категорий автомобильных дорог является более строгим, по сравнению с нормами Российской Федерации для дорог общего пользования, но хорошо согласуется с данными зарубежных компаний.

Требования к максимальной глубине колеи в зоне АВГК можно аргументировать необходимостью соблюдения допустимой высоты перепада в 3 мм между поверхностью датчика и дорожным покрытием [1, 6–10]. В процессе эксплуатации комплекса на полосе наката образуется колея, что приводит к формированию вертикального перепада у корпуса датчика. При достижении предельного значения в 3 мм необходимо выполнить шлифовку защитного слоя корпуса датчика, чтобы выровнять его с поверхностью дорожного покрытия. После этого датчик может продолжать функционировать до тех пор, пока не сформируется новый перепад высотой 3 мм относительно дна колеи.

Для нормального функционирования датчика допускается проведение не более двух шлифовок при толщине защитного покрытия 7 мм и не более трех шлифовок при толщине 10 мм. Таким образом, если толщина защитного полимерного слоя составляет 7 мм, максимально допустимая глубина колеи в зоне АВГК во время эксплуатации не должна превышать $2 \times 3 \text{ мм} + 3 \text{ мм} = 9 \text{ мм}$, а при толщине слоя 10 мм – 12 мм. В случае превышения этих значений необходимо заменить датчик, поскольку его ремонт с извлечением из дорожного покрытия производителями не предусмотрен. Глубина колеи в местах расположения WIM-датчиков, напрямую связанная с толщиной защитного слоя датчика, является ключевым фактором, определяющим как срок службы самого датчика, так и долговечность дорожного полотна перед ним.

Прочность дорожной одежды с покрытием нежесткого типа влияет на изменение продольной и поперечной ровности проезжей части в месте расположения АПВГК. Упругий прогиб конструкции, в зависимости от технической категории дороги, должен находиться в пределах 0,10–0,55 мм при нагрузке 50 кН на колесо движущегося ТС. Эти значения существенно ниже нормативных требований для автомобильных дорог общего пользования, где допустимый прогиб составляет 0,69–1,45 мм. Превышение допустимого прогиба под колесом тяжелого транспортного средства может привести к разрушению корпуса датчика и его поломке (рис. 4). Работу корпуса датчика можно рассматривать по схеме нагружения балки конечной длины на упругом основании с учетом допустимого прогиба корпуса датчика под нагрузкой от колеса автомобиля, приложенной на край балки, и прочности самого материала балки. Сохранность датчика обеспечивается при модуле упругости на дне штрабы под датчиком не менее 325 МПа [10].

Расчет по упругому прогибу дорожной одежды для весеннего расчетного периода следует выполнять по ГОСТ Р 71404–2024 с исключением верхней части покрытия на глубину штрабы. Расчет для жаркого летнего периода следует выполнять с учетом ОДМ 218.3.119–2019 при температурах асфальтобетона в пределах 40–50 °С. Согласно расчетам, для компенсации ослабления дорожной одежды штрабой необходимо увеличивать общий модуль упругости конструкции рядом с местом установки датчика на 30–40 % по сравнению с требованиями ГОСТ Р 71404–2024.

Минимальный общий модуль упругости дорожной конструкции региональных дорог рассчитывается по формуле (МПа)

$$E_{\text{общ}} = 1,3E_{\text{min}} \cdot K_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{общ}}$ – общий модуль упругости на поверхности конструкции; E_{min} – минимальный требуемый модуль упругости ГОСТ Р 71404–2024; $K_{\text{тр}}$ – требуемый коэффициент прочности.

Значения минимального модуля упругости приведены в таблице.

Минимальный требуемый модуль упругости нежесткой дорожной одежды в зоне АВГК

Minimum required elastic modulus of nonrigid pavement nearby WIM control system point

Категория дороги	Тип покрытия	Минимальный модуль упругости, МПа	
		ГОСТ Р 71404–2024	В зоне АВГК
III	Капитальный	365	475
IV		290	377
III	Облегченный	270	351
IV		190	247

Дополнительное повышение общего модуля упругости в местах установки датчиков обеспечивает прочность дорожной одежды на растяжение монолитных слоев при изгибе, а также предотвращает сдвиг в подстилающих грунтах и малосвязных конструктивных слоях [10]. Усиленная конструкция в зоне АВГК должна быть выполнена на протяжении участка длиной не менее 150 м. При этом нет необходимости в строгом совпадении начальной точки усиления конструкции дорожной одежды на одной полосе движения с конечной точкой усиления на противоположной полосе.

Для жестких дорожных одежд с бетонными покрытиями проблема обеспечения высокой прочности отсутствует.

Заключение

На основе проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Практика эксплуатации размещенных на региональных дорогах автоматических пунктов весогабаритного контроля выявила недопустимую погрешность весового контроля, связанную с низкими требованиями к ровности и прочности проезжей части в зоне их установки. Для обеспечения норматив-

ной точности весового контроля и надежной работы WIM-датчиков в течение 5 лет необходимо обеспечить повышенные требования к этим показателям.

2. На основании технического отчета о нарушениях на территории Волгоградской области установлено, что 10 % грузовых автомобилей на региональных дорогах превышают допустимую нагрузку на 20 %, что способствует интенсивному образованию дефектов дорожного покрытия (неровности и колеи). Неровности проезжей части создают дополнительные динамические перегрузки (удары колеса) на проезжую часть и весоизмерительные датчики. Колейность приводит к поперечному раскачиванию грузовых ТС, что недопустимо в зоне АВГК и ведет к снижению точности измерений.

3. Для проезжей части в зоне АВГК должны быть установлены повышенные требования к прочности (модулю упругости E), продольной ровности (IRI), колейности (глубине колеи). При вводе в эксплуатацию АПВГК индекс ровности IRI не должен превышать 1,9 м/км, а для эксплуатируемых АПВГК продольная ровность не должна превышать 3,92 м/км. Предельная глубина колеи для всех категорий дороги определена 9 мм. При толщине защитного слоя датчика 10 мм предельная глубина колеи увеличивается до 12 мм. В зоне АВГК не допускаются ямы, выбоины и трещины более ± 6 мм. Для региональных дорог III и IV категорий прочность дорожной конструкции должна быть на 30 % выше требований ГОСТ Р 71404–2024 и составлять 247–475 МПа (см. таблицу). Модуль упругости на дне штрабы весового датчика должен быть не менее 325 МПа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Беляев Н.Н.* Рекомендации по нормированию специальных эксплуатационных требований к дорожным одеждам АПВГК // *Дороги и мосты*. 2020. № 2 (44). С. 160–172. EDN: DLRAKQ
2. *George Y., Constantinou A.* Integration of weigh-in-motion technologies in road infrastructure management // *Ite Journal*. 2005. V. 75 (1). P. 39–43.
3. *Oskarbski J., Kaszubowski D.* Implementation of Weigh-in-Motion System in Freight Traffic Management in Urban Areas // *Transportation Research Procedia*. 2016. V. 16. P. 449–463. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.042
4. *Burnos P., Gajda J., Piwowar P., Sroka R., Stencel M., Zeglen T.* Accurate weighing of moving vehicles // *Metrology and Measurement Systems*. 2007. V. 14. № 4. P. 507–516.
5. *Gorodnichev M., Gematudinov R., Dzhabrailov Kh., Potapchenko T.* The Concept of an Automated Weight and Size Control System for Measuring the Mass of Freight Vehicles in a Traffic Flow (Weight-In-Motion) : Conference: 2019 // *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814120
6. *Кулижников А.М., Беляев Н.Н., Рахимова И.А.* Конструкции дорожных одежд в зонах АПВГК, работающих в режиме движения // *Мир дорог*. 2020. № 133. С. 82–85. EDN: MMGGDD
7. *Кулижников А.М., Рахимова И.А., Беляев Н.Н., Филиппов М.Д.* Требования к участкам автомобильных дорог с автоматическим пунктом весового и габаритного контроля // *Инновации в строительстве*. 2021. № 96. С. 36–41.
8. *Рахимова И.А., Кулижников А.М.* Требования к автоматическим пунктам весогабаритного контроля // *Дорожная держава. Специальный выпуск: Передовые технологии*, 2019. С. 59–61.
9. *Кулижников А.М., Рахимова И.А., Малевинский Н.К.* Требования к конструкциям дорожных одежд на автоматических постах весогабаритного контроля // *Мир дорог. Специальный выпуск*. 2019. С. 23–26.
10. *Беляев Н.Н., Рахимова И.А., Филиппов М.Д.* Требования к прочности нежестких дорожных одежд в зоне весового и габаритного контроля // *Дороги и мосты*. 2022. № 1 (47). С. 129–141. EDN: ODMPJF

11. Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И., Глазунов И.И. Влияние жесткости основания на напряжения в конструктивных слоях дорожной одежды // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 4 (85). С. 97–105. EDN: JGWUHR
12. Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И., Альшианова М.И. Влияние ровности дорожного покрытия на себестоимость перевозок и безопасность движения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 2 (79). С. 24–31. EDN: JBJIGP
13. Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И. Прогнозирование колеяности дорожного покрытия региональных дорог Нижнего Поволжья // Дороги и мосты. 2020. № 2 (44). С. 115–126. EDN: BHCCHT
14. Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHNU
15. *Protecting infrastructure and improving road safety*. URL: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAP-Commerce_Download_original/200-746e.pdf (дата обращения: 20.03.2025).
16. *'Copycats': a risk for users, and a problem for the industry*. URL: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/961-762e.pdf (дата обращения 20.03.2025).
17. Hans van Loo, Aleš Žnidarič. Guide for Users of Weigh-In-Motion. An Introduction To Weigh-In-Motion / ISWIM, International Society for Weigh-in-Motion. Radovljica, 2019. 81 p.

REFERENCES

1. Belyaev N.N. Recommendations on Standardizing Operational Requirements for Pavements in WIM System Point Locations. *Dorogi i mosty*. 2020; 2 (44): 160–172. EDN: DLRAKQ (In Russian)
2. George Y., Constantinos A. Integration of Weigh-in-Motion Technologies in Road Infrastructure Management. *ITE Journal*. 2016; 16: 39–43.
3. Oskarbski J., Kaszubowski D. Implementation of Weigh-in-Motion System in Freight Traffic Management in Urban Areas. *Transportation Research Procedia*. 2016; 16: 449–463. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.042
4. Burnos P., Gajda J., Piwowar P., Sroka R., Stencel M., Zeglen T. Accurate Weighing of Moving Vehicles. *Metrology and Measurement Systems*. 2007; 14 (4): 507–516.
5. Gorodnichev M., Gematudinov R., Dzhabrailov Kh., Potapchenko T. The Concept of an Automated Weight and Size Control System for Measuring the Mass of Freight Vehicles in a Traffic Flow (Weight-In-Motion). In: *Proc. Sci. Conf. 'Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications'*. 2019, Pp. 1–5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814120
6. Kulizhnikov, A.M., Belyaev N.N., Rakhimova I.A. Pavement Construction at WIM system Points. *Mir dorog*. 2020; (133): 82–85. EDN: MMGGDD (In Russian)
7. Kulizhnikov A.M., Rakhimova I.A., Belyaev N.N., Filippov M.D. Requirements for Pavements with WIM System Control Points. *Innovatsii v stroitel'stve*. 2021; (96): 36–41. (In Russian)
8. Rakhimova I.A., Kulizhnikov A.M. Requirements for Automatic Weight and Size Control Points. *Dorozhnaya derzhava. Special Issue "Peredovye tekhnologii"*. 2019; 59–61. (In Russian)
9. Kulizhnikov A.M., Rakhimova I.A., Malevinsky N.K. Requirements for Pavement Construction at Automatic WIM Control Points. *Mir dorog*. 2019; (special issue): 23–26. (In Russian)
10. Belyaev N.N., Rakhimova I.A., Filippov M.D. Requirements for Structural Strength of Nonrigid Pavements at WIM Control Points. *Dorogi i mosty*. 2022; 1 (47): 129–141. EDN: ODMPJF (In Russian)
11. Aleksikov S.V., Leskin A.I., Hoffman D.I., Glazunov I.I. Subgrade Stiffness Effect on Stresses in Structural Layers of Pavement. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2021; 4 (85): 97–105. (In Russian)
12. Aleksikov S.V., Leskin A.I., Hoffman D.I., Alshanova M.I. Pavement Smoothness Effect on Transportation Cost and Traffic Safety. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020; 2 (79): 24–31. (In Russian)
13. Aleksikov S.V., Leskin A.I., Hoffman D.I. Prediction of Pavement Rutting on Regional Roads in Lower Volga Region. *Dorogi i mosty*. 2020; 2 (44): 115–126. (In Russian)

14. Gorskii M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E. Temperature Effect on Flexural Bowl Determined by Falling Weight Deflectometer Testing. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (4): 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHU (In Russian)
15. Protecting infrastructure and improving road safety. Available: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/200-746e.pdf (accessed 03/20/2025).
16. 'Copycats': A risk for users, and a problem for the industry. Available: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/961-762e.pdf (accessed March 20, 2025).
17. Hans van Loo, Aleš Žnidarič. Guide for Users of Weigh-In-Motion. An Introduction to Weigh-In-Motion. ISWIM, International Society for Weigh-in-Motion. Radovljica, 2019. 81 p.

Сведения об авторах

Алексиков Сергей Васильевич, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Волгоградский государственный технический университет, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, AL34rus@mail.ru

Лескин Андрей Иванович, канд. техн. наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, leskien@inbox.ru

Гофман Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, obsov2012@mail.ru

Лескина Лейла Муаз, аспирант, Волгоградский государственный технический университет, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, leylamuaz@yandex.ru

Бормотов Сергей Николаевич, инженер, Волгоградский государственный технический университет, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1.

Authors Details

Sergey V. Aleksikov, DSc, Professor, Volgograd State Technical University, 28, Lenin Ave., 400005, Volgograd, Russia, AL34rus@mail.ru

Andrey I. Leskin, PhD, A/Professor, Volgograd State Technical University, 28, Lenin Ave., 400005, Volgograd, Russia, leskien@inbox.ru

Dmitry I. Gofman, PhD, A/Professor, Volgograd State Technical University, 28, Lenin Ave., 400005, Volgograd, Russia, obsov2012@mail.ru

Leyla M. Leskina, Research Assistant, Volgograd State Technical University, 28, Lenin Ave., 400005, Volgograd, Russia, leylamuaz@yandex.ru

Sergey N. Bormotov, Engineer, Volgograd State Technical University, 28, Lenin Ave., 400005, Volgograd, Russia.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 233–246.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 233–246.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.765

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-233-246

EDN: IKSHFD

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В СИСТЕМЕ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗИМНИМ СОДЕРЖАНИЕМ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Юлия Викторовна Коденцева, Анна Юрьевна Герлейн

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,
г. Омск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* В условиях ограниченного финансирования возрастает необходимость совершенствования системы зимнего содержания региональной сети автомобильных дорог, особенно оптимального распределения ресурсов.

Цель исследования. Разработка аналитической системы приоритетного распределения ресурсов (ПРР) в пределах муниципального района в системе зимнего содержания региональной сети автомобильных дорог.

Методы. В ходе исследования были применены методы анализа отечественного и зарубежного опыта решения задач совершенствования системы зимнего содержания дорог; формирования аналитической модели и методики построения аналитической системы ПРР для региональной сети автомобильных дорог.

Результаты. Предлагается решение проблемы обоснованного управления материальными и техническими ресурсами подрядной организации с помощью разработанной аналитической системы ПРР в зимнее время на региональной сети автомобильных дорог на территориях муниципальных центров.

Ключевые слова: автомобильные дороги, зимнее содержание автомобильных дорог, оперативное управление, стратегии зимнего содержания, система метеорологического обеспечения, рыхлый снег, снежный накат

Для цитирования: Коденцева Ю.В., Герлейн А.Ю. Оптимальное распределение ресурсов в системе оперативного управления зимним содержанием региональной сети автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 233–246. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-233-246. EDN: IKSHFD

ORIGINAL ARTICLE

THE BEST RESOURCE DISTRIBUTION IN OPERATIONAL MANAGEMENT SYSTEM FOR WINTER MAINTENANCE IN REGIONS**Yuliya V. Kodentseva, Anna Yu. Gerlein***Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia*

Abstract. In the conditions of limited funding there is an increasing need to improve the winter maintenance system of the regional road network, especially the appropriate distribution of resources.

Purpose: The development of the analytical system of priority resource allocation within a municipal district in the winter maintenance system of the regional road network.

Methodology/approach: The analysis of the Russian and foreign experience in improving the winter road maintenance system, the analytical model and methodology for constructing an analytical priority resource system for the regional road network.

Research findings: A solution is proposed for the problem of sound management of material and technical resources of a contractor using the developed analytical priority resource system in winter on the regional road network on territories of municipal centers.

Keywords: highway, loose snow, packed snow, winter maintenance, operational management, meteorological support system

For citation: Kodentseva Yu.V., Gerlein A.Yu. The Best Resource Distribution in Operational Management System for Winter Maintenance in Regions. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 233–246. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-233-246. EDN: IKSHFD

Введение

В настоящее время выполняется реализация национального проекта «Инфраструктура для жизни» (2019–2036 гг.), одной из основных целей которого является увеличение доли автомобильных дорог регионального значения, соответствующих нормативным требованиям. Возрастание интенсивности движения на дорогах приводит к повышению требований к качеству их содержания. Регламентированные технологии производства работ требуют увеличения материально-технических ресурсов для обеспечения своевременного и качественного обслуживания дорог в зимнее время. В условиях ограниченного финансирования для дорожных организаций часто не представляется возможным покупка дополнительной дорожной техники и большего количества противогололедных материалов (далее ПГМ). При этом экологические требования вынуждают снижать потребление химических реагентов, что приводит к необходимости применения превентивных мер и поиску новых технологических решений.

По итогам 2024 г. в Россию было ввезено на 23 % больше новых автотранспортных средств, чем в 2023 г., что предполагает значительный прирост фактической интенсивности движения¹. В настоящее время становится сложнее обеспечивать бесперебойность и безопасность движения.

¹ Молибога Е. Более 1 млн единиц новой автомобильной техники было импортировано в РФ в 2024 г. // Автостат. URL: <https://www.autostat.ru/news/59250/> (дата обращения: 23.03.2025).

Несвоевременность выполнения мероприятий по содержанию дорог в зимнее время имеет глобальные последствия, в частности повышение транспортных расходов за счет увеличения сроков доставки, рост числа ДТП и повышение износа автомобильного транспорта.

Конфликтные ситуации между заказчиком и подрядными организациями из-за неучета метеорологических и дорожных условий финансируемого участка дороги, а также несоответствия выделенных денежных средств требованиям нормативных документов усложняют ситуацию (рис. 1). Такая обстановка вынуждает подрядные организации работать с изношенном парком снегоочистительной техники, закупать более дешевые ПГМ, нарушать сроки производства работ, сокращать количество выполняемых циклов и допускать увеличение высоты снежных и снежно-ледяных отложений на покрытии проезжей части.

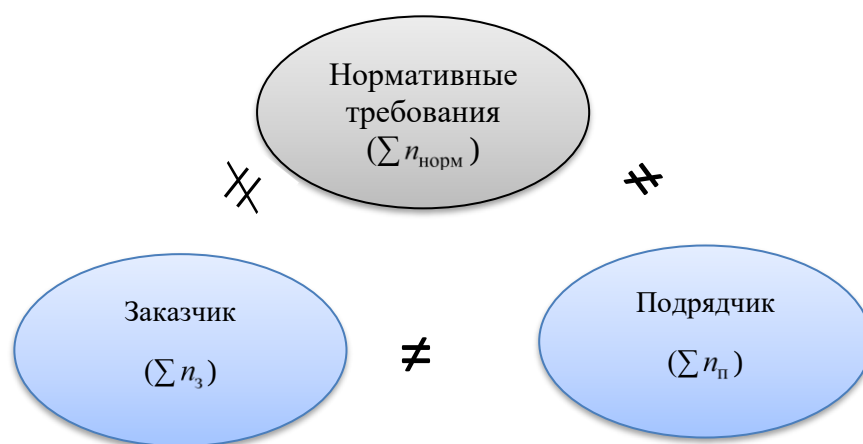


Рис. 1. Схема выполнения требований участников дорожной деятельности
Fig. 1. Schematic of the road management requirements

В силу необходимости работать в условиях ограниченного финансирования подрядчик управляет ресурсами из имеющегося многолетнего опыта обслуживания муниципального района, не имея возможности обоснованного принятия решения с технологической и экономической точки зрения в цикле динамического изменения дорожной и метеорологической ситуации. Данные обстоятельства существенно сокращают время на принятие решений.

В настоящей статье предлагается решение проблемы обоснованного управления материальными и техническими ресурсами подрядной организации с помощью аналитической системы приоритетного распределения ресурсов (ПРР) в зимнее время на региональной сети автомобильных дорог на территориях муниципальных центров.

Аналитическая система ПРР представляет собой интеграцию факторов влияния, направленную на формирование приоритетных рекомендаций подрядным и субподрядным организациям. Система позволяет поддерживать региональную сеть автомобильных дорог на необходимом уровне содержания даже в условиях нехватки ресурсов.

В настоящее время разработаны модели прогнозирования метеорологической и дорожной ситуации [1, 2, 3], которые позволяют заблаговременно определить вид гололедного явления на покрытии проезжей части, а также предложены расчеты циклов производства работ для предотвращения и ликвидации образования зимней скользкости. Сформирована методика дорожно-климатического районирования по неблагоприятным климатическим факторам [4, 5], обеспечивающая прогнозирование затрат для соответствующих зон с различными гололедными явлениями и снежными отложениями. Были исследованы и идентифицированы снегозаносимые участки и предложено решение на стадии проектирования [6, 7, 8]. Сформирована информационно-аналитическая система управления зимним содержанием автомобильных дорог с использованием структуризации параметров метеорологической информации для обоснования затрат на производство работ [9].

Интенсивное внедрение цифровых технологий в управление содержанием автомобильных дорог способствовало появлению программных комплексов в области дорожного и метеорологического мониторинга (таблица).

**Анализ существующих комплексов дорожного
и метеорологического мониторинга**
Analysis of road and meteorological monitoring systems

Наименование программных комплексов	Центр управления содержанием автомобильных дорог (ЦУСАД) ²	Автоматизированная система метеорологического обеспечения «Буревестник» ³	Система «СИНОП» ⁴	Система поддержки принятия решений (MDSS) ⁵ [10]
Достоинства	Имеет большую базу данных, а также выполняет их детальную проработку Предоставляет основной спектр рекомендаций по зимнему содержанию АД	Высокое качество прогнозирования изменения метеорологической информации	Прогноз погодных рисков с вероятностной оценкой масштабов последствий	Решает задачи уменьшения использования солей, снижения износа техники, сокращения сроков производства работ
Недостатки	Программа не учитывает материально-технические ресурсы подрядчика Не ставит цель снижения затрат	Отсутствует раздел по оптимальному выбору мероприятий по содержанию	Отсутствует комплексное решение задач зимнего содержания	Нельзя использовать в РФ из-за разной спецификации работ

² URL: https://mmlb.ru/catalog_solutions/tsentr-upravleniya-soderzhaniem-avtomobilnykh-dorog-tsusad (дата обращения: 17.11.2024).

³ URL: <https://asmobelgorod.ru/info> (дата обращения: 17.11.2024).

⁴ URL: <https://www.synop.ru/system/> (дата обращения: 17.11.2024).

⁵ The Weather Network Commercial Services Maintenance Decision Support System (MDSS) Field Trial – Final Report, The Weather Network Commercial Services, A Division of Pelmorex Media Inc., The Weather Network Commercial Services – Confidential. 2012. 34 p.

Также к аналогам можно отнести АДМС «Иней»⁶, «Восток-М»⁷, Мини-макс-94⁸, которые в большей степени нацелены на дорожный и метеорологический мониторинг. К недостаткам всех существующих комплексов можно отнести отсутствие цели снижения трудоемкости и управления ресурсами в условиях ограниченного финансирования.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующие разработки в полной мере отвечают поставленным задачам, однако в условиях динамического изменения метеорологической ситуации на автомобильных дорогах, нестабильной рыночной экономики, ограниченного финансирования и высоких нормативных требований необходимо комплексное решение формирования производственной программы зимнего содержания.

Методы

До настоящего времени при формировании производственной программы зимнего содержания не решена проблема приоритетности распределения ресурсов. Это связано со множеством факторов, влияющих на принятие решений, а также с динамикой изменения дорожной и метеорологической ситуации.

В данной работе предлагается сформировать аналитическую модель, способную реагировать на изменения дорожной и климатической ситуации в пределах одного муниципального района региональной сети автомобильных дорог. Модель позволяет формировать градацию распределения материальных и технических ресурсов с учетом основных факторов влияния (рис. 2). Данная модель рассмотрена на примере устранения дефектов покрытия проезжей части при интенсивности движения более 1500 авт/сут.

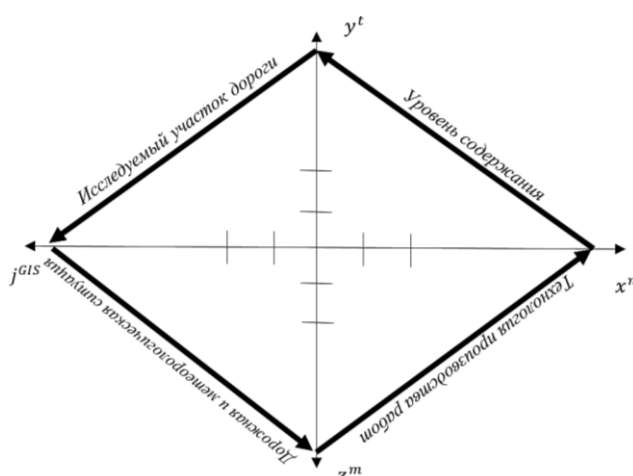


Рис. 2. Формирование пространств аналитической системы приоритетного распределения ресурсов

Fig. 2. Formation of spaces for the analytical priority resource system

⁶ URL: <https://trasscom.ru/product/avtomaticheskij-dorozhnyj-meteokompleks-inej/> (дата обращения: 17.11.2024).

⁷ URL: <https://vst10.ru/> (дата обращения: 17.11.2024).

⁸ URL: <https://mm94.ru/> (дата обращения: 17.11.2024).

Исходными данными будут являться:

1. Метеорологические данные (дорожные датчики или данные Гидрометцентра).
2. Нормативные требования (ГОСТ Р 59434–2021, ГОСТ Р 50597–2017, ГОСТ 59201–2021).
3. Материально-техническое оснащение дорожной службы (вид и количество техники, ПГМ).
4. Территориальное расположение исследуемого участка дороги, региональная сеть.
5. Технические характеристики исследуемого участка дороги (категория дороги, количество и ширина полос движения, фактическая интенсивность).

Необходимо определить основные области факторов влияния в данной модели:

- метеорологические данные;
- местоположение исследуемого участка дороги относительно муниципального центра;
- технические характеристики исследуемого участка дороги;
- перечень нормативных требований соответствующего уровня содержания.

В большинстве случаев парк техники и материальное оснащение располагаются на территории муниципального центра района. Для расчета дальности возки ПГМ и времени прибытия снегоуборочной техники предлагается разбить региональную сеть на мастерские участки длиной 1 км относительно муниципального центра.

Была создана система координат, где каждая ось представляет собой совокупность показателей для каждого фактора влияния, значение которых определяет их расположение на осях:

1. Метеорологические данные – ось z^m (вид зимней скользкости, продолжительность и интенсивность выпадения осадков).
2. Нормативные требования к состоянию покрытия проезжей части – ось x^n (критерий оценки дефекта, срок устранения дефекта).
3. Технические характеристики исследуемого участка дороги – ось y^t (ширина и количество полос движения).
4. Местоположение исследуемого участка дороги – ось j^{GIS} (отдаленность участка дороги относительно муниципального центра).

В данной системе координат было определено четыре пространства исходя из комбинаций осей:

1. Технология производства работ.
2. Уровень содержания.
3. Исследуемый участок дороги.
4. Дорожная и метеорологическая ситуация.

Для формирования зон необходимо обозначить граничные условия точками на каждой оси, которые будут являться катетами в прямоугольных треугольниках (рис. 3).

Красной обозначается зона повышенного внимания, определяющая первостепенное реагирование на сформированный прогноз. При этом могут сфор-

мироваться две и более аналогичные зоны, очередность выполнения мероприятий в этом случае определяется технико-экономическим расчетом.

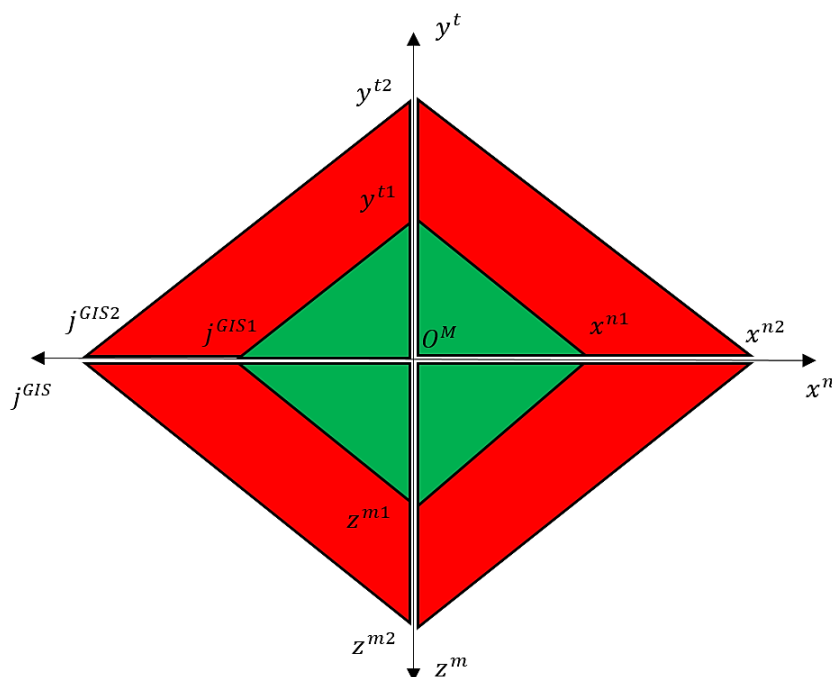


Рис. 3. Определение граничных условий осей факторов влияния аналитической системы приоритетного распределения ресурсов

Fig. 3. Boundary conditions of influencing factors of the priority resource system

Зеленая зона предполагает использование превентивных мероприятий в отношении соответствующего гололедного явления и не требует моментального реагирования.

В случае формирования стекловидного льда на покрытии проезжей части превентивным мероприятием будет выполнение предварительной обработки (зеленая область). Для рыхлого снега – назначение цикла снегоуборки, при котором высота отложений не достигает предельно допустимого значения к концу снегопада. При прогнозировании снежного наката граничным условием будет являться целесообразность выполнения предварительной обработки до начала снегопада с использованием технико-экономического обоснования (зеленая область).

Представим граничные условия для Оси z^m в виде логико-математических выражений:

– для зеленой области

$$\begin{cases} \text{если } \Pi_i = \text{Стекловидный лед, то } O^M z^{m1} \text{ соответствует } t_{\text{НПО}} \geq t_{\text{снэг}}; \\ \text{если } \Pi_i = \text{Рыхлый снег, то } O^M z^{m1} \text{ соответствует } h_{\text{рхр}} \leq h_{\text{доп}}; \\ \text{если } \Pi_i = \text{Снежный накат, то } O^M z^{m1} \text{ соответствует } t_{\text{НПО}} \geq t_{\text{снэг}}; \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 \text{– для красной области} \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 \text{если } \Pi_i = \text{Стекловидный лед, то } z^{m1}z^{m2} \text{ соответствует } t_{\text{НПО}} < t_{\text{снег}}; \\
 \text{если } \Pi_i = \text{Рыхлый снег, то } z^{m1}z^{m2} \text{ соответствует } h_{\text{рхр}} > h_{\text{доп}}; \\
 \text{если } \Pi_i = \text{Снежный накат, то } z^{m1}z^{m2} \text{ соответствует } t_{\text{НПО}} < t_{\text{снег}},
 \end{array} \right.
 \end{cases}$$

где Π_i – прогноз гололедного явления или снежных и снежно-ледяных отложений; $t_{\text{НПО}}$ – время работы ПГМ, ч; $t_{\text{снег}}$ – продолжительность снегопада, ч; $h_{\text{рхр}}$ – толщина рыхлого снега на покрытии проезжей части с соответствующей плотностью, см; $h_{\text{доп}}$ – предельно допустимая толщина талого снега, соответствующая уровню содержания автомобильной дороги, см.

Нормативные требования представляют собой совокупность критериев оценки дефектов (стекловидный лед, рыхлый снег, снежный накат) и сроков их ликвидации. Точная комбинация для каждого дефекта рассматривается отдельно, но общие граничные условия для оси x^n определяются следующим образом:

– для зеленой области

$O^M x^{n1}$ соответствует минимальный критерий оценки и максимальный срок устранения дефекта;

– для красной области

$x^{n1}x^{n2}$ соответствует минимальный (максимальный) критерий оценки и минимальный срок устранения дефекта.

Технические характеристики обслуживаемого участка дороги влияют как на уровень содержания, так и на расчет цикла производства работ. В системе ПРР ширина проезжей части оказывает влияние на принадлежность к области, своевременную очистку которой необходимо обеспечивать. Если имеющийся парк техники не может обеспечить прогнозируемое количество машин при одном отряде по всей ширине проезда, данная ситуация является критичной и служит обоснованием для формирования граничных условий оси y^t :

– для зеленой области

$$O^M y^{t1} \text{ соответствует } L_{\text{пч}} \leq l_{\text{отв}} \cdot n_T;$$

– для красной области

$$y^{t1}y^{t2} \text{ соответствует } L_{\text{пч}} > l_{\text{отв}} \cdot n_T,$$

где $L_{\text{пч}}$ – ширина проезжей части, м; $l_{\text{отв}}$ – ширина рабочего органа (отвала, щетки, распределения ПГМ), м; n_T – количество соответствующей техники на базе муниципального центра, шт.

Отдаленность участка дороги от муниципального центра предполагает увеличение затрат на горюче-смазочные материалы за счет дальности возки и требует учета заблаговременного выхода техники для обеспечения своевременного выполнения работ. Продолжительные снегопады и высокая интенсивность выпадения осадков усложняют ситуацию. С учетом вышеизложенного предлагается ограничить условия превентивных мер для оси j^{GIS} одним отрядом техники, способным выполнить цикл производства работ в один проход за весь снегопад:

– для зеленой области

$O^M j^{GIS1}$ соответствует $n \leq n_{co}, N_{nc} \leq 1$;

– для красной области

$j^{GIS1} j^{GIS2}$ соответствует $n > n_{co}, N_{nc} > 1$,

где n – общее количество машин, требуемых на весь период снегопада, шт.; n_{co} – количество снегоочистителей в одном отряде, шт.; N_{nc} – количество проходов снегоочистителей.

В результате были определены зеленые и красные пространства аналитической системы, которые можно выразить через площади прямоугольных треугольников:

– пространство превентивных мер

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{O^M z^{m1} \cdot O^M x^{n1}}{2} \text{ область технологии производства работ;} \\ \frac{O^M x^{n1} \cdot O^M y^{t1}}{2} \text{ область уровня содержания;} \\ \frac{O^M y^{t1} \cdot O^M j^{GIS1}}{2} \text{ область исследуемого участка дороги;} \\ \frac{O^M j^{GIS1} \cdot O^M x^{n1}}{2} \text{ область дорожной и метеорологической ситуации;} \end{array} \right.$$

– пространство повышенного внимания

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{O^M z^{m2} \cdot O^M x^{n2} - O^M z^{m1} \cdot O^M x^{n1}}{2}; \\ \frac{O^M x^{n2} \cdot O^M y^{t2} - O^M x^{n1} \cdot O^M y^{t1}}{2}; \\ \frac{O^M y^{t2} \cdot O^M j^{GIS2} - O^M y^{t1} \cdot O^M j^{GIS1}}{2}; \\ \frac{O^M j^{GIS2} \cdot O^M x^{n2} - O^M j^{GIS1} \cdot O^M x^{n1}}{2}. \end{array} \right.$$

Далее, определение принадлежности исследуемого участка дороги к зеленой или красной области позволяет сформировать стратегию назначения мероприятий по предотвращению и ликвидации отложений на проезжей части. Таким образом, зеленые зоны дают временные и материальные резервы.

1. Пространство дорожной и метеорологической ситуации – применение превентивных мероприятий по зимнему содержанию.

2. Пространство технологии производства работ – оптимизация прогнозируемого цикла производства работ.

3. Пространство уровня содержания – снижение уровня содержания.

4. Пространство исследуемого участка дороги – создание временного резерва.

Таким образом, для правильной работы аналитической системы ПРР (рис. 4) в первую очередь необходимо определить возможность и эффектив-

ность содержания соответствующих дорог в уплотненном снежном покрове (УСП) (рис. 4, шаг 1), мероприятия по содержанию таких дорог отличаются согласно нормативным документам. Затем формируется прогноз гололедного явления (рис. 4, шаг 2), относительно которого строится отдельная система координат ПРР и определяются граничные условия для каждой оси (см. рис. 3). В противном случае система фиксирует факт отсутствия прогноза гололедных явлений и необходимости выполнения мероприятий по зимнему содержанию.

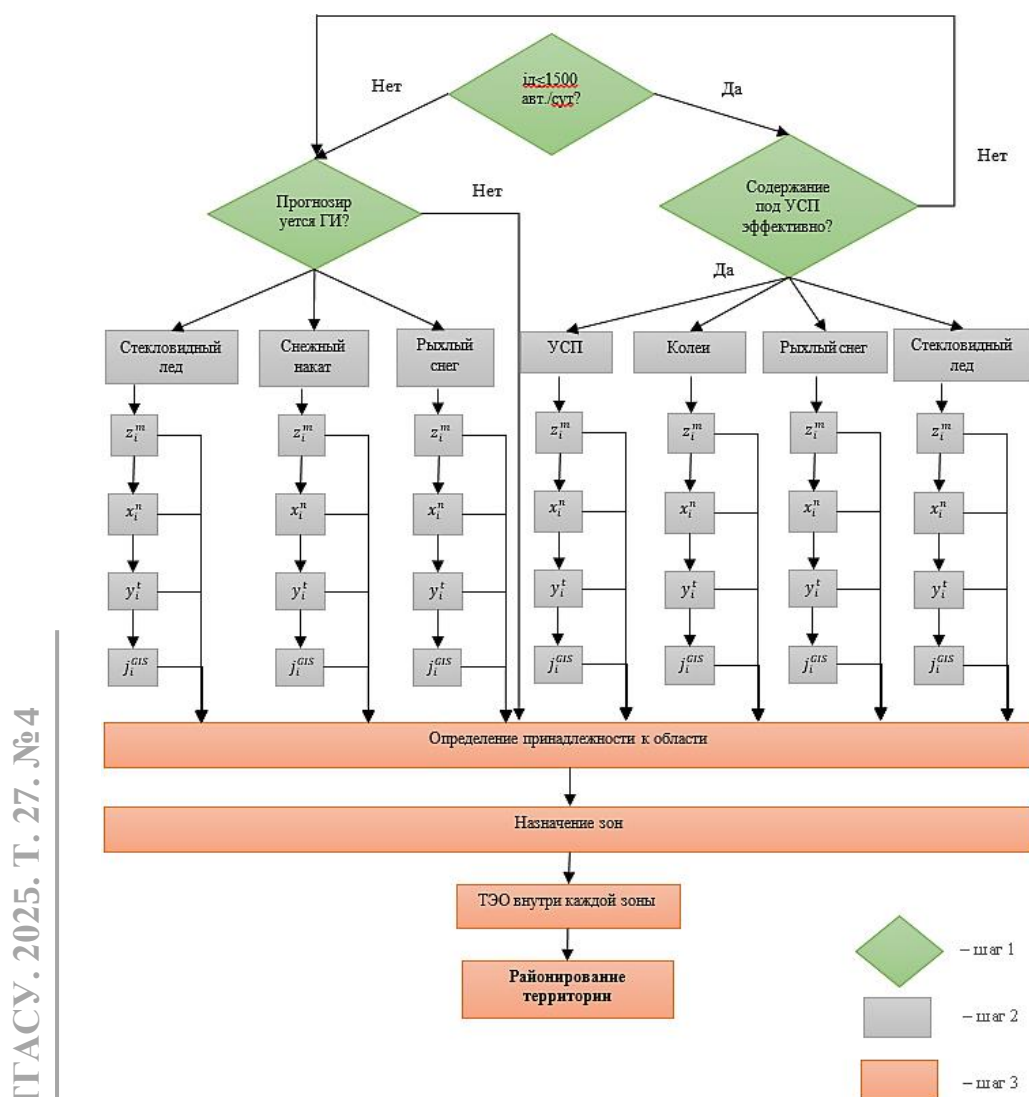


Рис. 4. Принцип последовательности расчетов распределения ресурсов

Fig. 4. The principle of consistency in resource allocation analysis

Затем для каждого участка дороги длиной 1 км определяются критерии факторов влияния по четырем осям (метеорологическая детализированная ин-

формация, соответствующая технология производства работ, критерии оценки соответствующего дефекта и сроки устранения (табл. 4 ГОСТ Р 50597–2017), ширина проезжей части и количество полос движения, отдаленность участка дороги относительно муниципального центра).

Согласно назначенным критериям определяется принадлежность участка к зеленой или красной области, что, в свою очередь, формирует соответствующие пространства в системе осей координат (рис. 4, шаг 3).

Затем назначаются зоны районирования территории, исходя из принадлежности каждого пространства к определенной зоне (красная (К) и зеленая (З)), где красному цвету на карте будет соответствовать зона с максимальной отдаленностью, жесткими нормативными требованиями и высокой категорией дороги. На данные зоны необходимо распределить материально-технические ресурсы. Система распределения зон выполняется следующими комбинациями:

$$\left\{ \begin{array}{l} K + K + K + K = 1; \\ K + K + K + Z = 2; \\ K + K + Z + Z = 3; \\ K + Z + Z + Z = 4; \\ Z + Z + Z + Z = 5, \end{array} \right.$$

где К – принадлежность i -го пространства к красной области, З – принадлежность i -го пространства к зеленой области, 1, 2, 3, 4, 5 – зоны на карте районирования территории, выделенные соответствующими цветами – красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой. Необходимо также обозначить зону 6 (белый цвет), в случае отсутствующего прогноза (см. рис 4, шаг 2).

Результаты

Таким образом, на карте формируются зоны как повышенной ответственности (красные), так и зоны с более низкими требованиями. Результативную приоритетность распределения ресурсов можно представить в виде перечня участков дороги от наиболее опасного (красный цвет) до участка с наименьшей ресурсоемкостью и трудозатратами в технологии производства работ. Схема также предоставляет визуализацию районирования территории.

В случае образования нескольких зон одинакового цвета необходимо выполнить технико-экономическое обоснование для создания внутренней приоритетности (рис. 4, шаг 3).

В результате расчетов формируются рекомендации для стратегического планирования мероприятий зимнего содержания автомобильных дорог с имеющимся парком техники и материальных ресурсов (рис. 5). Планирование осуществляется из расчета удаленности участков дороги, их технических характеристик, прогноза зимней скользкости и нормативных требований содержания. Комбинация таких факторов влияния выявляет очередность выполнения технологических операций на территории муниципального района и соответственно распределяет ресурсы. Кроме того, система позволяет сократить время на принятие решения за счет выполнения множества расчетов, в том числе технико-экономических обоснований выбора технологических операций.

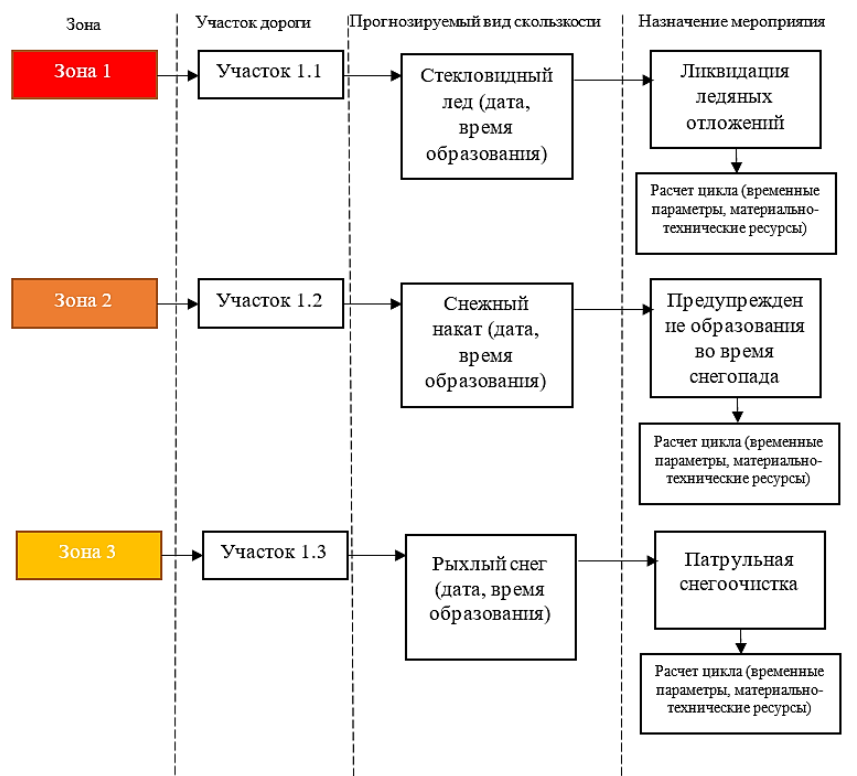


Рис. 5. Пример приоритетного назначения технологии производства работ с распределением ресурсов

Fig. 5. An example of priority assignment of production technology with resource allocation

Заключение

Разработанная аналитическая система ПРР дает возможность определить стратегию оптимизации материальных и технических ресурсов с учетом основных факторов влияния. Она предлагает комплексный подход к совершенствованию риск-ориентированного управления системы зимнего содержания региональной сети автомобильных дорог. Система ПРР предоставляет рекомендации с визуализацией районирования территории, сокращает время принятия решения, снижает стоимость работ и обосновывает трудозатраты с учетом индивидуальных возможностей парка техники по содержанию дорог в требуемом уровне. Это является актуальным в условиях ограниченного финансирования и нестабильных рыночных отношений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самодурова Т.В. Физико-статистические модели для прогноза образования зимней скользкости на дорожных покрытиях // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 1 (9). С. 128–132.
2. Самодурова Т.В. Оперативное управление зимним содержанием дорог. Научные основы. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2003. 168 с.

3. *Скоробогатченко Д.А.* Прогнозирование изменения транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог при планировании ремонта и содержания : специальность 05.23.11: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Волгоград : ВГАСУ, 2003. 158 с.
4. *Боброва Т.В., Коденцева Ю.В.* Районирование территории Алтайского края по условиям зимнего содержания сети автомобильных дорог : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. // Актуальные проблемы повышения надежности и долговечности автомобильных дорог и искусственных сооружений на них. 2003. С. 187–189.
5. *Коденцева Ю.В.* Обоснование ресурсоемкости зимнего содержания сети автомобильных дорог на основе районирования территорий по неблагоприятным климатическим факторам : специальность 05.23.11 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск : СибАДИ, 2007. 190 с.
6. *Самодурова Т.В., Гладышева О.В., Алимова Н.Ю., Перегудова В.Н.* Мониторинг снеготранспортируемых участков автомобильных дорог – информационное моделирование // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 4 (56). С. 91–100. DOI: 10.25987/VSTU.2019.56.4.008. EDN: YNWLTF
7. *Самодурова Т.В., Гладышева О.В., Алимова Н.Ю.* Повышение качества содержания снеготранспортируемых участков автомобильных дорог средствами инженерного мониторинга // Инновации в строительстве : сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию строительного института ФГБОУ ВО «БГИТУ». Брянск, 2020. С. 482–485.
8. *Самодурова Т.В., Гладышева О.В., Алимова Н.Ю., Бончева Е.А.* Проектирование земляного полотна автомобильных дорог на снеготранспортируемых участках // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 3 (67). С. 105–115. DOI: 10.36622/VSTU.2022.67.3.010. EDN: OKZAAS
9. *Коденцева Ю.В., Герлейн А.Ю.* Параметризация метеорологической информации при назначении мероприятий по зимнему содержанию автомобильных дорог // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 12 (138). С. 11. DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.146
10. *Petty K.R., Mahoney W.P.* The U.S. Federal Highway Administration winter road Maintenance Decision Support System (MDSS): Recent enhancements & refinements, Sirwec. 2008. P. 1–12.

REFERENCES

1. *Samodurova T.V.* Physical and Statistical Prediction models of Winter Slipperiness on Road Pavements. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2008; 1 (9): 128–132. (In Russian)
2. *Samodurova T.V.* Operational Management of Winter Maintenance. Scientific Foundations. Voronezh, 2003. 168 p. (In Russian)
3. *Skorobogatchenko D.A.* Prediction of Changes in Transport and Operational Condition of Roads in Planning Repairs and Maintenance. PhD Thesis, Volgograd, 2003, 158 p. (In Russian)
4. *Bobrova T.V., Kodentseva Yu.V.* Altai Territory Zonation Based on Winter Maintenance. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Improving Road and Artificial Structure Reliability'*, 2003, Pp. 187–189. (In Russian)
5. *Kodentseva Yu.V.* "Justification of resource intensity of winter maintenance based on territory zonation in unfavorable climatic conditions". PhD Thesis. Omsk, SibADI, 2007, 190 p. (In Russian)
6. *Samodurova T.V., Gladysheva O.V., Alimova N.Yu., Peregudova V.N.* Monitoring of Snow-Covered Sections of Highways – Information Modeling. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2019; 4 (56): 91–100. (In Russian)
7. *Samodurova T.V., Gladysheva O.V., Alimova N.Yu.* Quality Improvement of Snow-Covered Road Maintenance Using Engineering Monitoring. In: *Proc. Int. Conf. 'Innovations in Construction'*. Bryansk, 2020. Pp. 482–485. (In Russian)
8. *Samodurova T.V., Gladysheva O.V., Alimova N.Yu., Boncheva E.A.* Subgrade Design in Snow-Drift Areas. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2022; 3 (67): 105–115. DOI: 10.36622/VSTU.2022.67.3.010. EDN: OKZAAS (In Russian)

9. Kodentseva Yu.V., Gerlein A.Yu. Parameterization of Meteorological Information in Assigning Measures for Winter Maintenance. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2023; 12 (138): 11. DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.146 (In Russian)
10. Petty K.R., Mahoney W.P. The U.S. Federal Highway Administration Winter Road Maintenance Decision Support System (MDSS): Recent Enhancements & Refinements, *Sirwec*. 2008. Pp. 1–12.

Сведения об авторах

Коденцева Юлия Викторовна, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 644080, г. Омск, Мира, 5, kodjul78@mail.ru

Герлейн Анна Юрьевна, аспирант, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 644080, г. Омск, Мира, 5, d7_94@mail.ru

Authors Details

Yuliya V. Kodentseva, PhD, A/Professor, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, kodjul78@mail.ru

Anna Yu. Gerlein, Research Assistant, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, d7_94@mail.ru

Вклад авторов

Коденцева Ю.В. – научное руководство; концепция исследования; итоговые выводы.

Герлейн А.Ю. – концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Kodentseva Yu.V. – supervision, conceptualization, conclusions.

Gerlein A.Yu. – conceptualization, methodology, writing -- original draft preparation, conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 247–268.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 247–268.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268

EDN: YQOBTA

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСЧЕТНОЙ НАГРУЗКИ НА ДОРОЖНЫЕ ОДЕЖДЫ

Алексей Евгеньевич Симчук

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Вопросы точности расчета параметров воздействия колес грузового транспорта на покрытие автомобильной дороги остаются актуальными в связи с увеличением интенсивности движения и нагрузок. Современные методики проектирования дорожных одежд, основанные на нормативных документах (ГОСТ Р 71404–2024), не всегда учитывают фактические условия эксплуатации шин и их влияние на покрытия. Это приводит к несоответствию расчетных данных реальному воздействию транспортных средств, что может приводить к ускоренному износу дорожного покрытия и снижению эксплуатационной надежности дорожной конструкции.

Цель исследования заключается в анализе и экспериментальной оценке параметров воздействия колес грузового транспорта на дорожные покрытия для уточнения расчетных значений давления, размера пятна контакта и температурных зависимостей.

Методы исследования включали анализ современных систем мониторинга изменения температуры воздуха, давления в шинах и осевых нагрузок, а также проведение натурных экспериментов в различных скоростных и климатических условиях. Был выполнен мониторинг указанных параметров при движении грузового автомобиля по автомобильным дорогам.

Результаты исследования. Выявлены закономерности изменения температуры и давления в шинах в зависимости от условий эксплуатации. Проведено сопоставление фактических значений внутреннего давления в шинах с расчетными. Показано, что традиционный подход, предполагающий неизменное внутреннее давление в шинах, не соответствует реальным условиям движения. Установлено, что фактические значения внутреннего давления в шинах значительно превышают расчетные значения, применяемые при проектировании дорожных одежд.

В завершение работы предложены направления дальнейших исследований для совершенствования методики расчета дорожных одежд с учетом фактических параметров воздействия транспортных средств.

Ключевые слова: транспортные нагрузки, нормативная нагрузка, расчет дорожной одежды, асфальтобетон, контактное давление, пятно контакта, диаметр отпечатка колеса, натурные исследования

Для цитирования: Симчук А.Е. Экспериментальные исследования параметров воздействия расчетной нагрузки на дорожные одежды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 247–268. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268. EDN: YQOBTA

ORIGINAL ARTICLE

**IMPACT OF DESIGN LOAD PARAMETERS
ON ROAD PAVEMENTS****Aleksei E. Simchuk***Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. The article is devoted to theoretical and experimental studies of the impact parameters of truck wheels on road pavements. Modern systems of air temperature, tire pressure, and axle load monitoring are analyzed and selected. Monitoring of these parameters is carried out during the truck motion on roads at various speed and in different climatic conditions. Changes in the tire temperature and pressure are identified depending on operating conditions. A comparison is made between the actual and calculated internal tire pressure. It is found that the experimentally obtained internal tire pressure significantly exceeds that used in the pavement design. Further research aims at improving the pavement design methodology.

Purpose: The aim is to analyze and experimentally evaluate the impact load of truck wheels on the road surface to clarify the calculated pressure, contact patch size and temperature dependencies.

Methodology: The analysis of modern systems for monitoring changes in air temperature, tire pressure and axle loads, full-scale experiments at various speed and in different climatic conditions. The above parameters are monitored while a truck moves on roads.

Research findings: Temperature and tire pressure changes are identified depending on operating conditions. The internal tire pressure is compared to calculated ones. It is shown that the traditional approach, which assumes constant internal tire pressure, does not correspond to real driving conditions. It is found that actual values of internal tire pressure significantly exceed the calculated values used in the road pavement design.

Value: Research fields are proposed to improve the methodology for calculating road pavements, taking into account actual parameters of the live load.

Keywords: asphalt concrete, pavement analysis, contact pressure, contact patch, wheel impression diameter, normative load, field studies, transportation load

For citation: Simchuk A.E. Impact of Design Load Parameters on Road Pavements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 247–268. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268. EDN: YQOBTA

Введение

В настоящее время в РФ действующим документом, определяющим проектирование нежестких дорожных одежд, является ГОСТ Р 71404–2024 [1]. Расчет дорожных одежд на прочность выполняется с учетом нормативной нагрузки. Для автомобильных дорог с капитальным типом дорожной одежды она составляет 115 кН, а облегченных и переходных типов – 100 кН. В применяемой методике [1], как и в перспективных направлениях расчета многослойных дорожных одежд [2], основными расчетными параметрами взаимодействия колеса автомобиля с покрытием являются контактное давление и размер пятна контакта. Указанные параметры, наряду с температурными зависимостями модуля упругости асфальтобетона, также являются определяющими при инструментальной оценке прочности дорожных одежд [3]. Давление колеса на покрытие от нормативной нагрузки считают равномерно распределенным по площади отпечатка колеса. В соответствии с ГОСТ 32960 [4] для капитальных

типов дорожной одежды оно составляет 0,8 МПа, а для облегченных и переходных типов – 0,6 МПа. Необходимо отметить, что традиционно в отечественной практике принимался постулат о неизменности внутреннего давления воздуха в колесе в процессе движения, которое приравнивается к давлению колеса на покрытие. Также важным параметром является диаметр отпечатка колеса, который рассчитывается в зависимости от скорости движения и величины нагрузки. Данный параметр находится в пределах от 30,3 до 37,1 см. При этом наибольшему диаметру соответствует наименьшее расчетное давление, принимаемое для облегченных дорожных одежд. Это в свою очередь нивелирует отличие в расчетных нагрузках и часто приводит к неадекватным результатам расчетов конструкций. Подходы к расчету диаметра отпечатка колеса в зависимости от давления были заложены в отечественной нормативной базе в 1960–80-х гг. и остаются действующими по настоящее время. Однако они не учитывают фактические размеры отпечатков современных грузовых шин, что неадекватно отражает воздействие транспорта на дорожную одежду. В связи с этим необходимо выполнить актуализацию расчетных значений проведением натурных исследований шин в полевых и лабораторных условиях.

Взаимодействие автомобильной шины с дорожным покрытием

При движении автомобиля по дороге в зоне контакта шины колеса с покрытием возникают динамические вертикальные, продольные и поперечные касательные силы, реальная величина которых меняется в зависимости от состояния покрытия, скорости движения, характеристик автомобиля и типоразмера шин.

Колесо автомобиля может находиться в состоянии покоя или в движении. В состоянии покоя на колесо действует только одна сила – нормальная нагрузка P_z (G) [5]. Однако особенностью автомобильного колеса является его эластичность: под воздействием вертикальной силы колесо деформируется (преодолевающая силы упругости каркаса и сопротивления внутреннего давления воздуха, а также силы трения в резине), формируется площадь его контакта с твердой поверхностью (рис. 1). В этой зоне статический радиус колеса (r_{st}) становится меньше, чем в других частях колеса (r_s), не соприкасающихся с покрытием.

В динамике параметры в зоне контакта шины и покрытия изменяются под влиянием крутящего или тормозного момента. Схема взаимодействия колеса с дорожным покрытием представлена на рис. 2.

Для проектирования автомобильных дорог в первую очередь важны параметры взаимодействия системы «пневматическая шина – дорожное покрытие», включая площадь контакта по выступам рисунка протектора (F_v) или в контурной площади (F_k) их контакта (п. 14–15 ГОСТ 17697 [5]). Эти параметры используются в формулах ГОСТ Р 71404–2024 [1] при расчете дорожной одежды: напряжение в дорожной одежде вычисляется по формуле

$$\sigma_z = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

где σ_z – напряжение в дорожной одежде, Н/м²; P – нагрузка, передаваемая колесом, Н; A – площадь пятна контакта, м². В первую очередь это важно для шин наиболее нагруженных осей грузовых автомобилей, оказывающих наибольшее

воздействие на конструктивные слои дорожных одежд. Хотя статические параметры такого воздействия могут быть измерены с помощью различных стендов и измерительного оборудования, проведение подобных испытаний в реальных условиях прямолинейного качения грузового колеса при движении под нагрузкой является затруднительным даже при небольших скоростях.

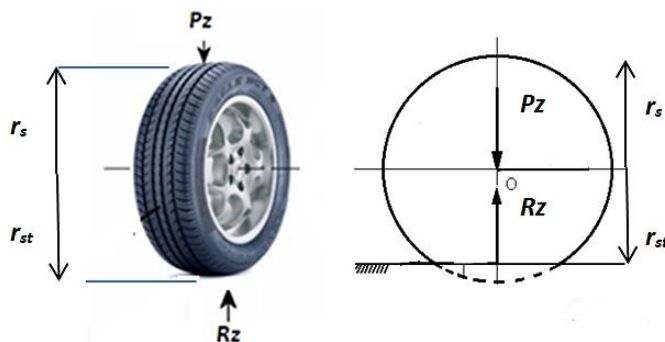


Рис. 1. Основные параметры воздействия нормальной нагрузки в системе «пневматическая шина – дорожное покрытие»:

P_z – нормальная нагрузка, Н; R_z – нормальная реакция опорной поверхности, Н; r_s – свободный радиус колеса, м; r_{st} – статический радиус колеса, м (составлено на основе ГОСТ 17697–72)

Fig. 1. Main parameters of normal load impact in pneumatic tire–road surface system:

P_z – normal load, N; R_z – normal reaction of the supporting surface, N; r_s – free radius of the wheel, m; r_{st} – static radius of the wheel, m

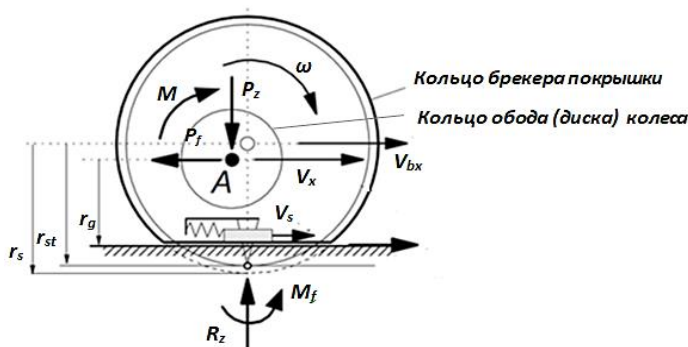


Рис. 2. Схема взаимодействия пневматической шины с твердой поверхностью в режиме свободного качения под нагрузкой:

r_s – свободный радиус колеса, м; r_{st} – статический радиус колеса, м; r_g – кинематический радиус (радиус качения) колеса, м; A – ось колеса; ω – угловая скорость, рад/с; M – крутящий момент колеса, Н·м; P_f – сила сопротивления качению колеса, Н; M_f – момент сопротивления качению, Н·м; V_s – скорость продольного скольжения, м/с; V_x – поступательная скорость оси колеса, м/с; V_{bx} – поступательная скорость центра колеса, м/с (по [6])

Fig. 2. Interaction between pneumatic tire and hard surface in free rolling mode under load:

r_s – wheel free radius, m; r_{st} – wheel static radius, m; r_g – wheel kinematic radius (rolling radius), m; A – wheel axis; ω – angular velocity, rad/s; M – wheel torque, N·m; P_f – wheel rolling resistance force, N; M_f – rolling resistance, N·m; V_s – longitudinal slip velocity, m/s; V_x – translational velocity of the wheel axis, m/s; V_{bx} – translational velocity of the wheel center, m/s, according to H. Pacejka, 2012 [6]

Тем не менее исследованиями отечественных специалистов в 1970-х гг. [7] были установлены следующие закономерности:

1. По краям пятна контакта давление на поверхность выше, чем в центре шины. При увеличении нагрузки боковины начинают «выгибаться», особенно у диагональных шин, которые широко использовались в те годы. Современные радиальные шины с жестким металлическим каркасом (металлокорд) такой особенностью не обладают. На рис. 3 показано воздействие неподвижной шины на поверхность.

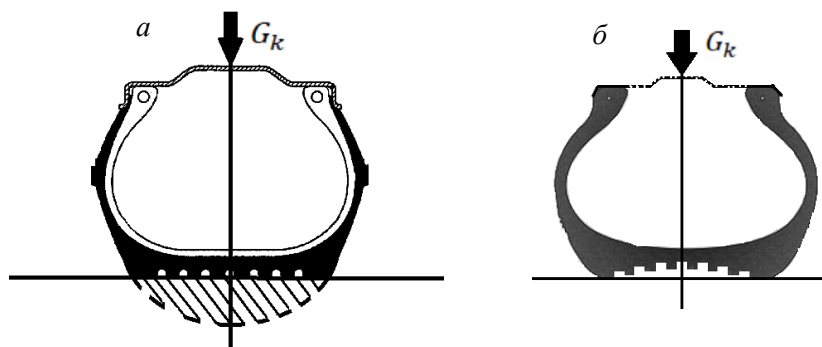


Рис. 3. Распределение давлений по площади пятна контакта неподвижного колеса, опирающегося на жесткую поверхность:

a – профиль шины при нормальной нагрузке на колесо; *б* – профиль шины при сверхнормативной нагрузке (по [7])

Fig. 3. Pressure distribution over the contact patch area of stationary wheel resting on a rigid surface: *a* – under normal load; *b* – under excess load [7]

2. Давление распределяется по-разному в зависимости от скорости движения. Однако для скоростей до 80–100 км/ч распределение остается как у неподвижного колеса. Диаграмма распределения давления от скорости показана на рис. 4.

Графики демонстрируют распределение удельного давления q в контакте шины с дорожным покрытием: рис. 4, *a* иллюстрирует продольное распределение давления вдоль направления движения, рис. 4, *б* – поперечное распределение давления относительно средней плоскости колеса. Кривые 1–5 соответствуют скоростям движения 25, 50, 100, 150 и 180 км/ч. Анализ графиков показывает, что с увеличением скорости происходит перераспределение давления: оно возрастает в передней части пятна контакта и снижается по краям. На графике (рис. 4, *б*) также заметна тенденция к снижению давления по краям при возрастании скорости. Это подтверждает предположение о перераспределении нагрузки в центральную зону контакта. Таким образом, с увеличением скорости движения автомобиля удельное давление в контакте шины с покрытием изменяется: наблюдается его перераспределение в сторону центра пятна контакта и увеличение максимальных значений давления, особенно в передней части (по направлению движения).

3. Во время качения шины внутри нее возникают трение и деформации, вызывающие ее нагрев. Принято считать, что оптимальная температура нормальной работы шины составляет 70–75 °С при температуре окружающего воздуха 20 °С.

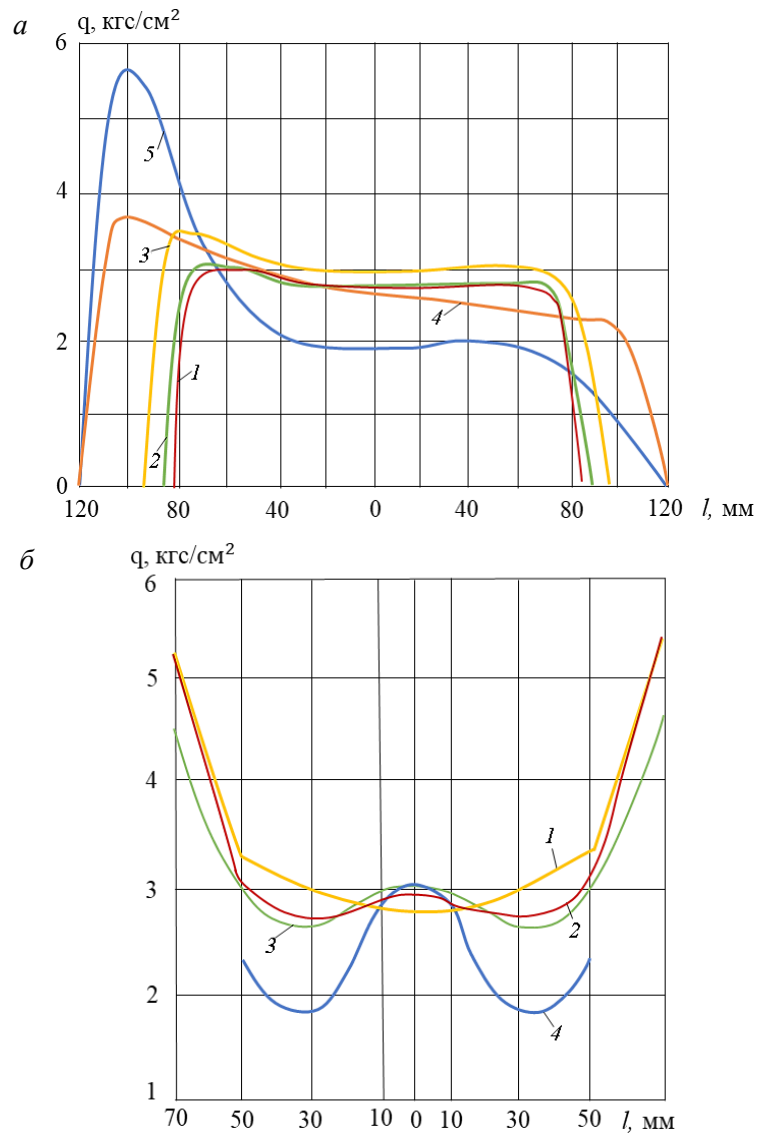


Рис. 4. Распределение удельных давлений q в контакте шины: кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют давлениям в продольной плоскости симметрии контакта (а) и средней поперечной плоскости (б) соответственно при скоростях движения 25, 50, 100, 150 и 180 км/ч (по [7])

Fig. 4. Distribution of specific pressure q in the tire contact: curves 1, 2, 3, 4, and 5 correspond to the pressure in the longitudinal plane of contact symmetry (a) and the average transverse plane (b) at 25, 50, 100, 150, and 180 km/h, respectively

По требованиям Правил ЕЭК ООН, на бортах каждой пневматической шины указано значение внутреннего давления воздуха (в PSI), которое измеряется в условиях «холодной шины». Несложно определить, что при температуре воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в процессе эксплуатации шины (т. е. при качении под нагрузкой) температура воздуха в ней поднимется на $50\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$, что в силу газового закона

Шарля (в закрытой среде соотношение давления газа и его температуры – величина постоянная) приведет к росту внутреннего давления воздуха в шине примерно на 15,8 %. Этот факт необходимо учитывать при определении и нормировании расчетного давления колеса на покрытие, т. к. исторически, согласно документам, посвященным проектированию нежестких дорожных одежд, давление на покрытие принимается равным давлению внутри шины.

Пятно контакта шины оказывает влияние на напряжено-деформированное состояние дорожных одежд и, как следствие, на долговечность автомобильных дорог. Это свидетельствует о необходимости определения фактических размеров пятна контакта с учетом давления и температуры в шине. В связи с отсутствием теоретических подходов к решению данной задачи необходимо провести натурные (полевые) и лабораторные испытания с различными типами колес грузовых автомобилей. Полученные данные позволят построить математическую модель для определения геометрических параметров пятна контакта и подготовить предложения по внесению изменений в действующие методики расчета дорожной одежды.

Экспериментальные исследования параметров грузовых шин при движении по автомобильным дорогам

Выбор и характеристики грузового автомобиля. На основе информации о составе транспортных потоков на федеральных автомобильных дорогах общего пользования, полученной с пунктов учета интенсивности движения (ПУИД) и автоматических пунктов весового и габаритного контроля (АПВГК), наиболее распространенным является пятиосный автопоезд в составе двухосного седельного тягача с полуприцепом, классифицируемый как группа 9 по табл. А.1 ГОСТ 32965 [8]. Схема расположения колес представлена на рис. 5.



Рис. 5. Варианты транспортных средств для проведения натурных (полевых) испытаний: а – стандартный трейлер для перевозки грузов общей массой до 25 т; б – стандартный битумовоз с цистерной объемом 26 м³ (по материалам открытых интернет-источников)

Fig. 5. Vehicle options for field testing: а – standard trailer for transporting cargo with a total weight of 25 t; б – standard bitumen tanker with a 26 m³ tank (from open-source materials)

Грузовые транспортные средства данной категории обычно комплектуются шинами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Спецификация грузовых пневматических шин для установки на грузовые транспортные средства группы 9 по ГОСТ 32965 [8]

Table 1

Specification of pneumatic truck tires for installation on group 9 trucks according to GOST 32965 [8]

Вариант комплектации	Ось транспортного средства	Конфигурация колеса оси	Типоразмер шин	Максимальный вес нормальной статической нагрузки на шину, кгс	Рекомендуемое давление воздуха в холодной шине, МПа
1	Рулевая	Одинарное	295/80R2	3350	0,85
	Ведущая	Сдвоенное	2.5 152/148	3150	
2	Рулевая	Одинарное	315/80R2	3750	0,90
	Ведущая	Сдвоенное	2.5 154/150	3350	
3	Прицепная	Одинарное	385/65R2 2.5 160	4500	0,90

Для проведения натурных исследований был выбран автомобиль на базе тягача IVECO Stralis ES, предоставленный ООО «Газпромнефть-Битумные материалы» (рис. 6).



Рис. 6. Общий вид седельного тягача с полуприцепом (битумовоза) ООО «Газпромнефть-Битумные материалы». Фото автора

Fig. 6. General view of tractor with a semi-trailer (bitumen tanker) from ООО "Gazpromneft-Bitumen Materials"

Масса порожней автоцистерны составляет 3650 кг, а максимально допустимая масса автоцистерны с битумом – 36 200 кг. Общая масса с грузом достигает 49 000 кг. Расположение колес автомобиля представлено на рис. 7.

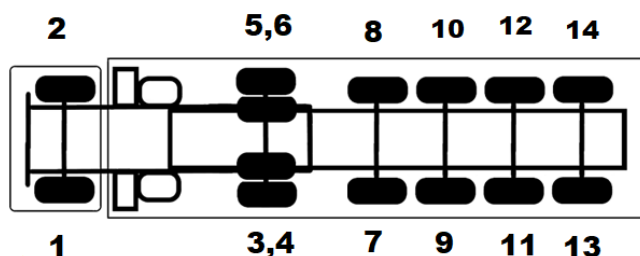


Рис. 7. Расположение колес автомобиля (составлено автором)

Fig. 7. Location of car wheels

На используемом грузовом автомобиле установлены следующие типы колес:

- колеса 1 и 2: Bridgestone (Польша), типоразмер 315/80 R22.5, индекс нагрузки 156/150 L, рекомендуемое давление 850 кПа;
- колеса 3, 4, 5 и 6: Yokohama 705R (Тайланд), типоразмер 315/80 R22.5, индекс нагрузки 154/150 M, рекомендуемое давление 850 кПа;
- колеса 7 и 8: Roadgo Orium (Румыния), типоразмер 385/65 R22.5, индекс нагрузки 160K, рекомендуемое давление 900 кПа;
- колеса 9–12: Cordiant Proffessional TR-1, типоразмер 385/65 R22.5, индекс нагрузки 160K, 158L, рекомендуемое давление 900 кПа.

Системы мониторинга. Для проведения исследований на испытательную модель была установлена бортовая система мониторинга температуры и внутреннего давления воздуха в шинах. Датчики были вмонтированы во все колеса транспортного средства за исключением колес 13 и 14, расположенных на значительном удалении от принимающего устройства, что делало невозможным получение устойчивого сигнала.

Применяемая система производства компании VESA systems включает два программных модуля мониторинга:

- система мониторинга параметров шин (температура, давление);
- система мониторинга осевых нагрузок.

Система мониторинга параметров шин состоит из нескольких элементов: дисплея, репитера, ресивера, внутреннего датчика. Дисплей принимает информацию с датчиков и репитера и передает ее на экран или другие внешние устройства. Репитер – усилитель сигнала, который принимает информацию с удаленных датчиков, например прицепа, и передает ее на дисплей или ресивер. Ресивер – преобразователь сигнала, принимает информацию с датчиков и репитера и передает на внешние устройства. Внутренний датчик – беспроводной датчик со встроенным радиочастотным передатчиком, который устанавливается на колесный диск с помощью стального червячного хомута. Общая схема системы мониторинга показана на рис. 8. Пример установки внутреннего датчика на колесо испытательной модели приведен на рис. 9.



Рис. 8. Общая схема системы мониторинга (составлено автором на основе технической документации)

Fig. 8. Schematic of the monitoring system



Рис. 9. Внутренний датчик с креплением на диск колеса. Фото автора

Fig. 9. Internal sensor with wheel rim mount

Система мониторинга осевых нагрузок предназначена для измерения осевых нагрузок, полной массы автомобиля и груза. Она включает в себя следующие элементы: индикатор загрузки, который устанавливается в панель кабины и отображает осевые нагрузки, полную массу и вес груза; весовой контроллер – центральная часть системы, которая преобразует сигналы с датчиков

в весовые показатели и передает информацию на дисплей, а также в систему мониторинга; датчик давления Wabco (Вабко) – высокоточный датчик, который устанавливается непосредственно в подушки или в трубки подвески транспортного средства через быстросъемные крепления.

Элементы системы взвешивания и контроля осевых нагрузок для пневмоподвески представлены на рис. 10.



Рис. 10. Элементы системы взвешивания и контроля осевых нагрузок для пневмоподвески (по материалам Wabco)

Fig. 10. Elements of the weighing and axle load control system for air suspension (from Wabco documents)

После установки и калибровки обеих систем они были подключены к базе мониторинга Wialon, которая позволяет вести удаленный непрерывный контроль за параметрами транспортных средств и анализировать объем перевозок за определенный период. Система позволяет проводить измерения в реальном времени и анализировать объем собранных данных. Wialon – программная платформа с web-интерфейсом для спутникового мониторинга транспорта. Сбор данных производится с помощью спутникового модуля, трекера в автомобиле, который определяет местоположение транспортного средства и собирает информацию от штатного оборудования и дополнительных датчиков. Затем данные передаются через каналы GSM или спутниковой связи на сервер Wialon. В web-интерфейсе Wialon пользователь получает обработанную информацию о координатах объекта, времени, скорости, параметрах внешних и внутренних датчиков бортового оборудования и т. п. Общая схема работы системы Wialon представлена на рис. 11.



Рис. 11. Общая схема работы Wialon¹
Fig. 11. General scheme of Wialon operation

Результаты мониторинга. После завершения установки и калибровки всех систем испытательный автомобиль был запущен в регулярные рейсы. Его маршруты охватывали всю европейскую часть РФ, что позволило исследовать различные регионы и климатические зоны. Данные мониторинга поступали ежедневно на протяжении года, что обеспечило учет таких факторов, как температура окружающего воздуха, изменяющаяся в зависимости от времени года, а также меняющиеся осевые нагрузки. Полный маршрут движения автомобиля за все время испытания показан на рис. 12.

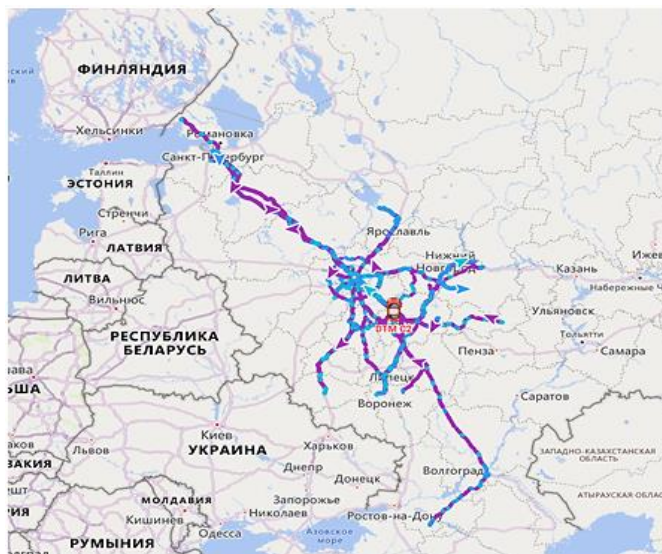


Рис. 12. Маршрут передвижения автомобиля в процессе проведения исследований из сервиса Wialon (на основе данных платформы Wialon²)
Fig. 12. Vehicle route during research from the Wialon service

¹ URL: <https://wialon.com>

² Там же.

Наиболее информативными оказались результаты мониторинга за период с мая по август, когда были зарегистрированы пики температуры как окружающего воздуха, так и внутри шин. Эти данные позволили установить наиболее вероятное давление в шинах. Результаты мониторинга за период приведены на рис. 13–20 и в табл. 2–5.

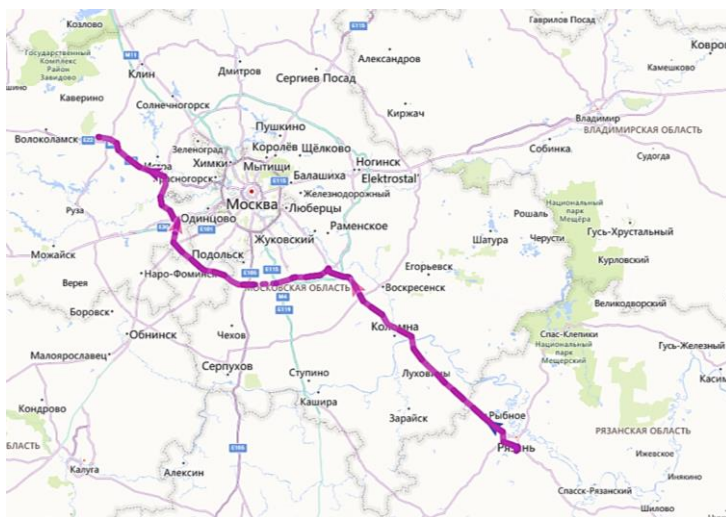


Рис. 13. Маршрут автомобиля 22.05 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 13. Car route on 22.05

Графики температур и давления в шинах за 22.05 показаны на рис. 14.

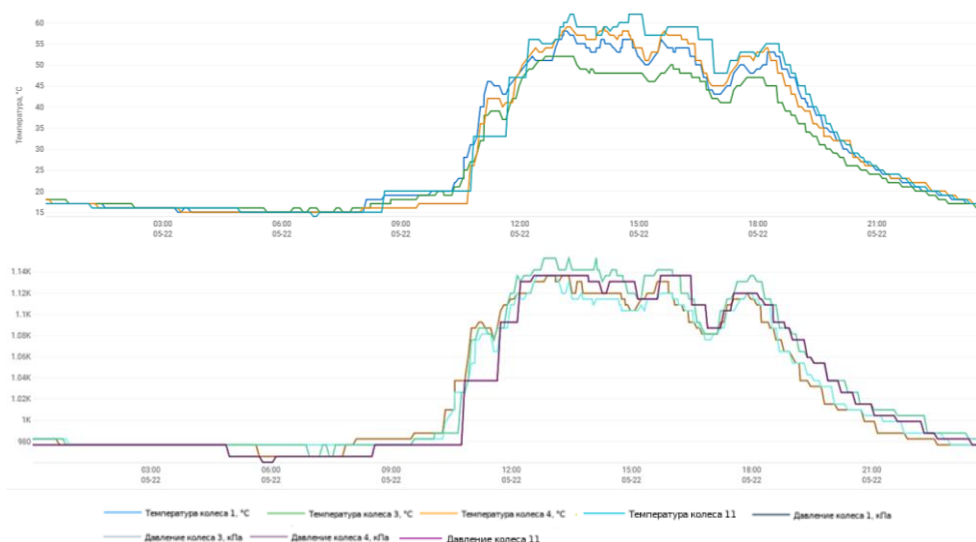


Рис. 14. Графики температур и давления в шинах за 22.05 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 14. Tire temperature and pressure on 22.05

Таблица 2

Сводные данные по изменению параметров 22.05

Table 2

Parameter measurement on 22.05

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{cp \min}$	$P_{cp \min}$	$t_{cp \max}$	$P_{cp \max}$
1 (рулевая)	6,9	19	0,982	54	1,116
3 (ведущая)	10,5	17	0,977	48	1,113
4 (ведущая)		16	0,977	56	1,134
11 (прицепная)	7,6	18	0,972	59	1,131

На рис. 15 показан маршрут движения автомобиля в течение дня 26.06.

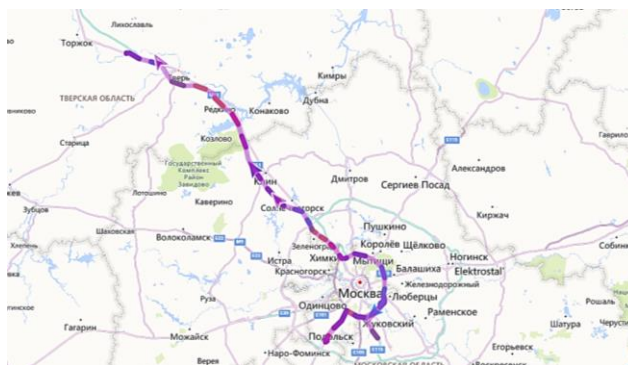


Рис. 15. Маршрут автомобиля 26.06 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 15. Car route on 26.06

Графики температур и давления в шинах за 26 июня показан на рис. 16.

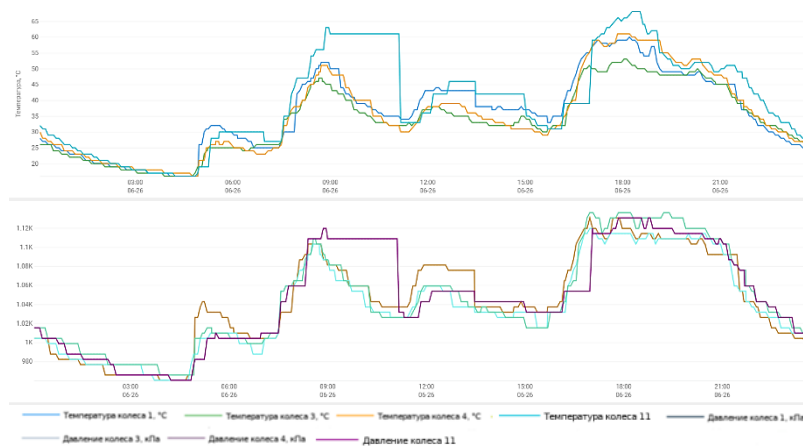


Рис. 16. Графики температур и давления в шинах 26.06 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 16. Tire temperature and pressure on 26.06

Сводные данные по изменению параметров 26.06 указаны в табл. 3.

Таблица 3

Сводные данные по изменению параметров 26.06

Table 3

Parameter measurement on 26.06

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{\text{ср min}}$	$P_{\text{ср min}}$	$t_{\text{ср max}}$	$P_{\text{ср max}}$
1 (рулевая)	7,0	17	0,960	53	1,110
3 (ведущая)	11,0	17	0,966	49	1,109
4 (ведущая)		18	0,970	55	1,125
11 (прицепная)	8,0	17	0,960	57	1,117

На рис. 17 показан маршрут движения автомобиля в течение дня 24.07.

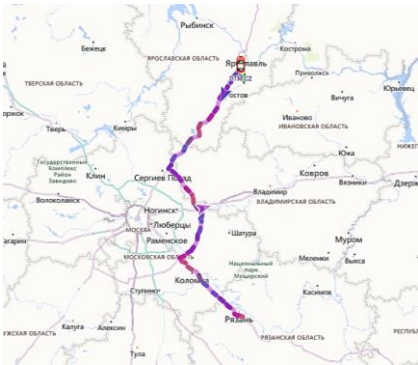


Рис. 17. Маршрут автомобиля 24.07 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 17. Car route on 24.07

Графики температур и давления в шинах за 24 июля показан на рис. 18.

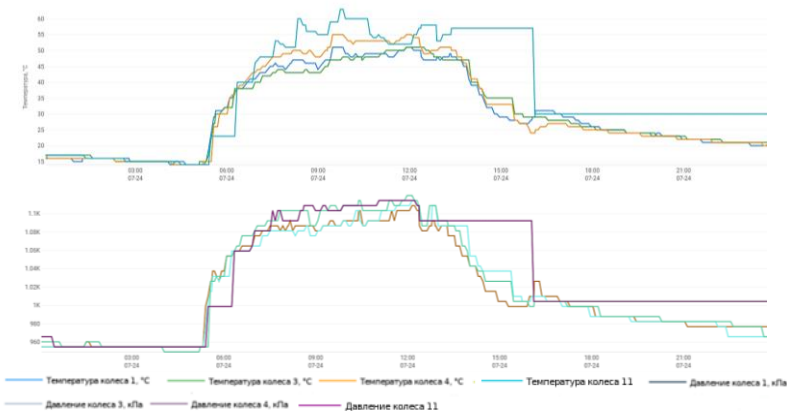


Рис. 18. Графики температур и давления в шинах за 24.07 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 18. Tire temperature and pressure on 24.07

Сводные данные по изменению параметров 24.07 указаны в табл. 4.

Таблица 4

Сводные данные по изменению параметров 24.07

Table 4

Parameter measurement on 24.07

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{\text{ср min}}$	$P_{\text{ср min}}$	$t_{\text{ср max}}$	$P_{\text{ср max}}$
1 (рулевая)	6,9	14	0,955	48	1,091
3 (ведущая)	10,4	14	0,955	46	1,091
4 (ведущая)		14	0,950	51	1,104
11 (прицепная)	7,4	14	0,955	55	1,104

На рис. 19 показан маршрут движения автомобиля в течение дня 21.08.

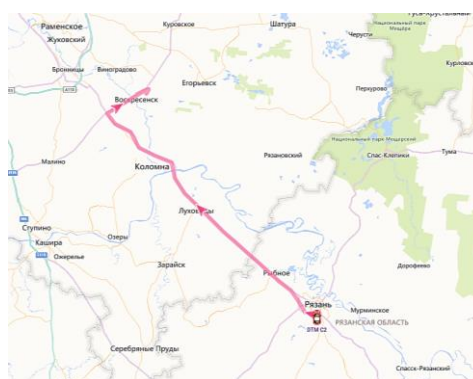


Рис. 19. Маршрут автомобиля 21.08 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 19. Car route on 21.08

Графики температур и давления в шинах за 21 августа показан на рис. 20.

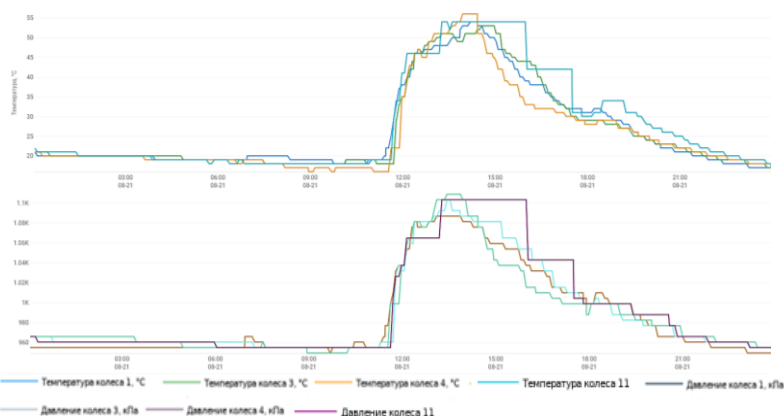


Рис. 20. Графики температур и давления в шинах за 21.08 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 20. Tire temperature and pressure on 21.08

Сводные данные по изменению параметров 21.08 указаны в табл. 5.

Таблица 5

Сводные данные по изменению параметров 21.08

Table 5

Parameter measurement on 21.08

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{cp \text{ min}}$	$P_{cp \text{ min}}$	$t_{cp \text{ max}}$	$P_{cp \text{ max}}$
1 (рулевая)	6,9	19	0,955	48	1,083
3 (ведущая)	10,5	19	0,955	48	1,087
4 (ведущая)		18	0,952	50	1,095
11 (прицепная)	7,7	18	0,955	50	1,085

Результаты

По результатам проведенного мониторинга установлено, что давление внутри колес непосредственно зависит от температуры внутри шин, которая увеличивается из-за силы трения, нагрузки и скорости движения автомобиля. Среднее увеличение температуры в колесе во время движения составило 31–37 °С, а максимальный зарегистрированный прирост за период измерений достигал 41 °С. Характерная зависимость давления в шинах от температуры внутри шины и ее скорости движения показана на рис. 21.

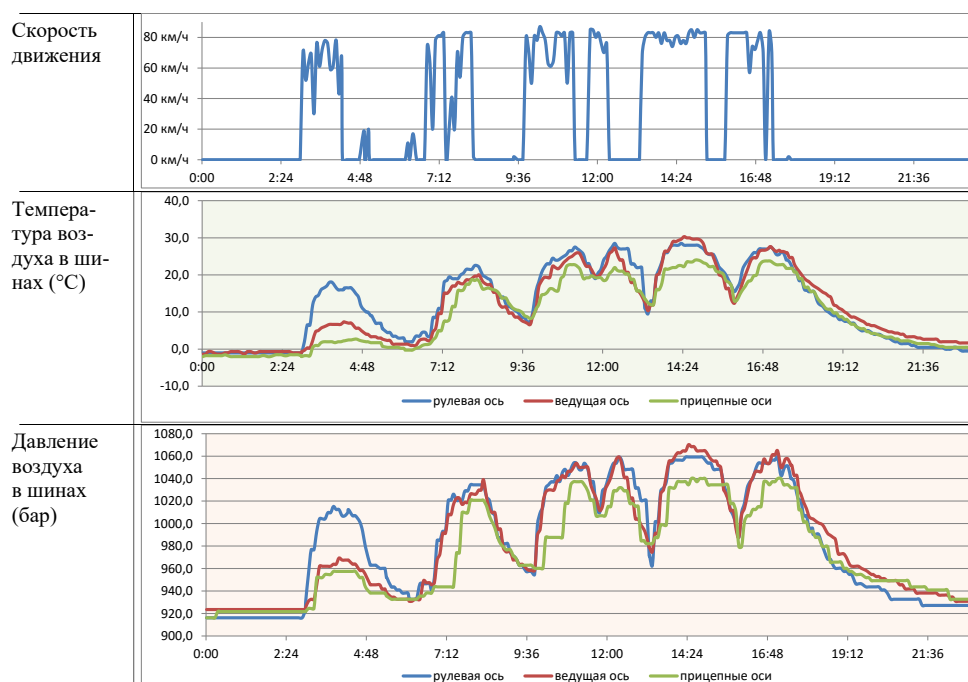


Рис. 21. Графики температур, давления и скорости шин за ноябрь (составлено автором по данным мониторинга Wialon)

Fig. 21. Tire temperature and pressure in November

Для анализа зависимости давления от температуры в шинах для каждого дня мониторинга были вычислены коэффициенты пропорциональности при минимальных и максимальных параметрах по формулам:

$$k_1 = \frac{P_{\min}}{T_{\min}}; \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{P_{\max}}{T_{\max}}, \quad (3)$$

где k_1 – при минимальных значениях; k_2 – при максимальных значениях.

Для минимизации влияния различных случайных ошибок было взято среднее значение между k_1 и k_2 по формуле

$$k = \frac{k_1 + k_2}{2}. \quad (4)$$

В результате вычислений удалось установить значение $k \approx 0,00338$. Этот коэффициент может быть применен для прогноза давления в шинах при температуре от 5 до 75 °С внутри колеса с использованием следующей формулы:

$$P = k(t + 273,15), \quad (5)$$

где P – давление, МПа; t – температура окружающей среды, °С; k – коэффициент пропорциональности.

По результатам исследований установлены следующие закономерности:

- согласно техническим требованиям производителей, давление в «холодных» шинах (до начала движения) для большинства современных грузовых колес, используемых на наиболее широко распространенных грузовых автомобилях для магистральных перевозок, при нормативной загрузке составляет от 0,8 до 0,9 МПа;

- в рамках эксперимента давление в «холодных» шинах в большинстве случаев составляло 0,9 МПа, что соответствует рекомендациям, указанным на колесах;

- в процессе эксплуатации при движении автомобиля (в течение не менее 3 ч) воздух в шинах нагревается в среднем на 35 °С относительно начальной температуры, что приводит к увеличению внутреннего давления до 1,1 МПа;

- измеренное фактическое давление в шинах значительно превышает нормативные значения, принимаемые при расчете дорожных одежд. Согласно действующим нормативным документам, давление в шинах принимается равным давлению на покрытие и для облегченных дорожных одежд составляет 0,6 МПа, для капитальных – 0,8 МПа. Максимально зафиксированное фактическое давление превышает расчетное на 83 % для облегченных и на 37 % для капитальных дорожных одежд.

Полученные результаты опровергают принимаемые в настоящее время постулаты о неизменности давления в шинах при движении автомобиля и ставят под сомнение принимаемые расчетные параметры.

Как видно из рис. 22, температура окружающего воздуха в начале и по завершении пути (за период мониторинга) не оказывает значительного влияния на температуру и давление внутри колес. Однако температура внутри ко-

лес у пустого и загруженного автомобиля во время движения различается существенно.

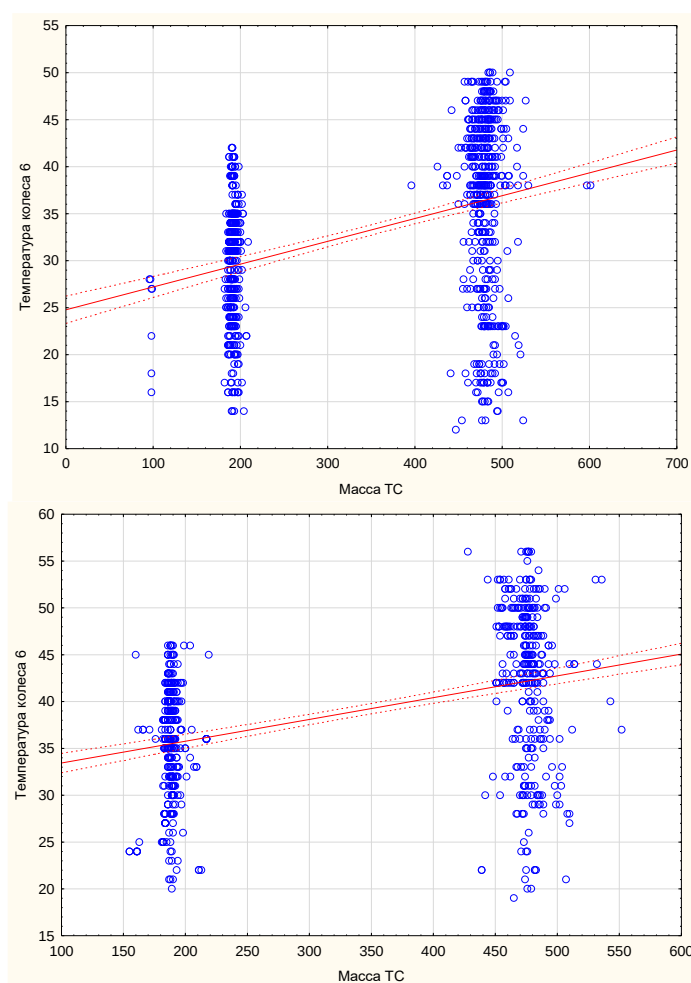


Рис. 22. Данные по температуре колес на оси у пустого и груженого автомобиля за май и август (составлено автором по результатам мониторинга)

Fig. 22. Wheel temperature of empty and axle loaded vehicle for May and August

В среднем давление в колесах при движении автомобиля с грузом увеличивалось на 15 %. Минимальный прирост давления за период наблюдений составил 9 %, максимальный – 18 %.

Отдельно необходимо выделить спаренные колеса ведущей (наиболее загруженной) оси. Было установлено, что они нагреваются и изменяют давление в процессе движения по-разному: внешнее колесо нагревается меньше, чем внутреннее. Можно сделать предположение, что это явление связано с различным охлаждением в процессе движения. Так, внешнее колесо подвержено более интенсивному охлаждению за счет воздействия внешних воздушных масс, тогда как внутреннее колесо экранировано внешним и имеет меньший контакт

с окружающим воздухом. Поэтому разница в температуре соседних колес, хоть и находящихся на одной оси, в период движения составляет 7–12 °С (рис. 23).

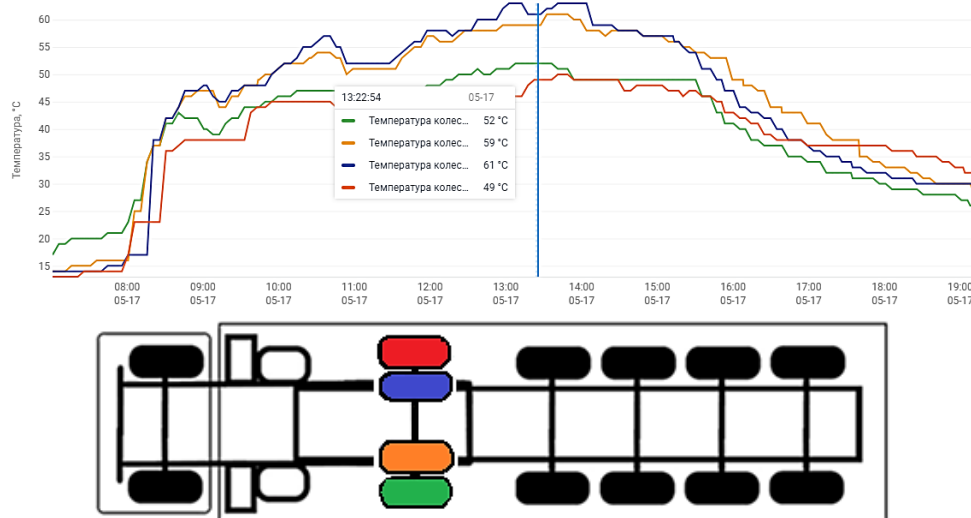


Рис. 23. Различие температуры внешних и внутренних колес (составлено автором)

Fig. 23. Difference in temperature between outer and inner wheels

Установить, что наибольшая нагрузка приходится на спаренные колеса ведущей оси, можно по данным рис. 24, где синяя и красная линии относятся к общей массе транспортного средства и массе груза соответственно, а следующая линия (красная) является ведущей осью и имеет существенное различие в нагрузке с другими осями данного транспортного средства. Это подтверждает значительное различие в показателях давления и температуры ведущей оси по сравнению с другими осями.

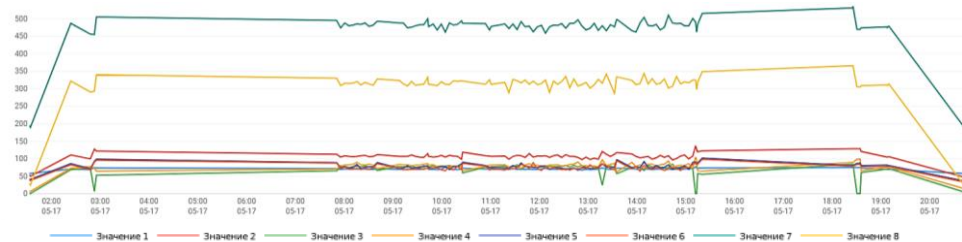


Рис. 24. График нагрузки на оси:

значение 1 – рулевая ось грузовика; значение 2 – ведущая ось грузовика; значение 3 – первая ось прицепа; значение 4 – вторая ось прицепа; значение 5 – третья ось прицепа; значение 6 – четвертая ось прицепа; значение 7 – общая масса транспортного средства; значение 8 – масса груза (составлено автором по данным весовой системы)

Fig. 24. Axle load:

1 – truck steering axle; 2 – truck drive axle; 3 – trailer first axle; 4 – trailer second axle; 5 – trailer third axle; 6 – trailer fourth axle; 7 – vehicle total weight; 8 – load weight

Выводы

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили выявить закономерности изменения температуры и давления в шинах в зависимости от условий эксплуатации.

Показано, что фактические значения внутреннего давления в шинах существенно превышают расчетные. В то же время расчетными параметрами при проектировании и оценке прочности дорожных одежд является контактное давление, принимаемое равным давлению в шине, и отпечаток колес автомобиля.

Полученные на данном этапе результаты могут быть использованы для постановки эксперимента для стендовых испытаний по определению фактических параметров площади пятна контакта и давления колеса на покрытие, а также для анализа закономерности их изменения в различных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 71404–2024. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд : введ. 2024-01-01. Москва : Стандартиформ, 2024. 45 с.
2. Горский М.Ю., Кадыров Г.Ф., Стрельцов А.В., Симчук Е.Н. Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства // Дороги и мосты. 2021. № 2 (46). С. 53–74. EDN: TPWVZF
3. Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHNU
4. ГОСТ 32960–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения. Москва : Стандартиформ, 2016. 8 с.
5. ГОСТ 17697–72. Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. Москва : Изд-во стандартов, 1972. 26 с.
6. Pacejka H.B., Besselink I.J.M. Tire and Vehicle Dynamics, (3 ed.). Elsevier, 2012. 632 p. ISBN-978-0-08-09016-5.
7. Кнороз В.И., Кленников Е.В., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. Работа пневматической шины. Москва : Транспорт, 1976. 238 с. URL: <https://laz-legend.ru/library/knoroz-rabota-avtomobilnoj-shiny-1976.html>
8. ГОСТ 32965–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока. Москва : Стандартиформ, 2019. 26 с.

REFERENCES

1. GOST R 71404–2024. Public roads. Design of flexible road pavements. Introduced. 2024-01-01. Moscow: Standartinform, 2024. 45 p. (In Russian)
2. Gorsky M.Yu., Kadyrov G.F., Streltsov A.V., Simchuk E.N. Methodology Improvement of Flexible Road Pavement Analysis in Terms of the Elasticity Theory for Multilayer Half-Space. *Dorogi i mosty*. 2021; 2 (46): 53–74. (In Russian)
3. Gorskiy M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E. Temperature Effect on Flexural Bowl Determined by Falling Weight Deflectometer Testing. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (4): 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHNU
4. GOST 32960–2014. Public roads. Standard loads, design loading schemes, Moscow: Standartinform, 2016. (In Russian)
5. GOST 17697–72. Automobiles. Wheel rolling. Terms and definitions. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1972. (In Russian)

6. Pacejka H.B., Besselink I.J.M. Tire and Vehicle Dynamics, 3rd edn., 2012, 632 p. ISBN-978-0-08-09016-5.
7. Knoroz V.I., Klennikov E.V., Petrov I.P., Sheloukhin A.S., Yuryev Yu.M. Pneumatic Tire Operation, Moscow: Transport, 1976. Available: <https://laz-legend.ru/library/knoroz-rabota-avtomobilnoj-shiny-1976.html> (In Russian)
8. GOST 32965–2014. Public roads. Methods for measuring traffic intensity. (In Russian)

Сведения об авторе

Алексей Евгеньевич Симчук, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. alexsimchuk@bk.ru

Author Details

Aleksei E. Simchuk, Research Assistant, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, Saint-Petersburg, Russia, alexsimchuk@bk.ru

Статья поступила в редакцию 23.04.2025
Одобрена после рецензирования 04.06.2025
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 23.04.2025
Approved after review 04.06.2025
Accepted for publication 26.06.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 269–279.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 269–279.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.9

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-269-279

EDN: JMZUOU

МОДЕРНИЗАЦИЯ СНЕЖНЫХ ПОЛИГОНОВ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Дмитрий Павлович Лучинский¹, Вера Дмитриевна Тимоховец²,
Максим Владимирович Швырёв²**

¹*Акционерное общество «Мостострой-11», г. Тюмень, Россия*

²*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена несоответствием инфраструктуры снежных полигонов в урбанизированных районах Российской Федерации современным экологическим, инженерным и экономическим нормам. Проблемы, связанные с утилизацией снежных масс, а также существенные недостатки функционирования действующих полигонных комплексов требуют разработки научно обоснованных решений для проведения комплексной модернизации данных объектов. Создание снежных полигонов, отвечающих принципам устойчивого развития и экологической безопасности, представляет собой значимую научную задачу, требующую системного подхода и детального анализа.

Цель. Разработка современного снежного полигона, который будет отвечать современным экологическим, техническим и экономическим стандартам.

Проведен анализ состояния снежных полигонов на территории Российской Федерации, рассмотрены последствия их неэффективного функционирования и отсутствия, дана оценка их текущего состояния и выявлены основные проблемы, такие как загрязнение почвы и водоемов талыми водами, содержащими вредные вещества и твердые отходы.

Результаты. На основе полученных данных разработана модернизированная версия снежного полигона с асфальтобетонным покрытием и системой очистки талых вод. Предложенная конструкция позволяет предотвратить попадание загрязняющих веществ и твердых отходов от таяния снежных масс в почву и обеспечивает удаление привнесённой воды из основания и земляного полотна под площадкой.

Практическая значимость исследования подтверждается внедрением предложенной модернизированной версии снежного полигона в г. Тюмени, где объект успешно функционирует.

Ключевые слова: дорожная отрасль, зимнее содержание автомобильных дорог, снегоочистка, снежный полигон, снегоприемные пункты, дренажная система, подъездная автодорога, блоки типа Нью-Джерси

Для цитирования: Лучинский Д.П., Тимоховец В.Д., Швырёв М.В. Модернизация снежных полигонов в крупных городах Российской Федерации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 269–279. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-269-279. EDN: JMZUOU

ORIGINAL ARTICLE

MODERNIZATION OF SNOW POLYGONS IN CITIES OF THE RUSSIAN FEDERATION

Dmitrij P. Luchinskii¹, Vera D. Timohovets², Maksim V. Shvyryov²¹AO "Mostostroy-11", Tyumen, Russia²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. In urbanized areas of the Russian Federation, the infrastructure of snow landfills does not meet modern environmental, engineering, and economic standards. This fact makes it necessary to carry out a comprehensive modernization of these facilities. The relevance of this study is determined by the problems associated with the utilization of snow masses, as well as the significant disadvantages of existing landfill complexes. The development of upgraded landfills that meet the requirements of sustainable development and environmental safety is a significant scientific task that requires a detailed analysis and systematic approach.

This paper analyzes the problems of snow polygons existing on the territory of the Russian Federation and the consequences of their absence, their current state, and identifies shortcomings in their functioning.

Based on the data obtained, an upgraded version of the snow landfill with an asphalt concrete surface is proposed, provided with a cleaning system that avoids harmful substances and solid waste from melting snow masses into the soil and removing the introduced water from the base and the earthbed under the site.

The proposed upgraded version of the snow training ground was put into operation in Tyumen and is successfully operating.

Keywords: road industry, snow landfill, road winter maintenance, snow removal, snow collection points, drainage system, access road, New Jersey type blocks

For citation: Luchinskii D.P., Timokhovets V.D., Shvyrev M.V. Modernization of Snow Polygons in Cities of the Russian Federation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 269–279. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-269-279. EDN: JMZUOU

Введение

Актуальность модернизации снежных полигонов обусловлена проблемами снежных отложений и рядом недостатков существующих снежных полигонов естественного таяния (рис. 1). В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют системные исследования, направленные на устранение выявленных недостатков данных объектов. Разработка современного снежного полигона, который будет отвечать экологическим, техническим и экономическим стандартам, представляет собой актуальную научную задачу, требующую детального анализа и комплексного подхода. Целью настоящей работы является решение указанной проблемы путем разработки инновационных решений модернизации снежных полигонов.

Проблемы несвоевременной очистки снежных отложений

На территории большей части Российской Федерации обильные снегопады оказывают существенное негативное влияние на качество жизни населения и функционирование всех сфер деятельности. Снежные заносы [1] препятствуют проезду машин экстренных служб, затрудняют доступ к медицинским

учреждениям, административным зданиям и торговым центрам, а также снижают безопасность беспрепятственного передвижения пешеходов [2]. Для систематизации сфер влияния снежных отложений в пределах городской территории была разработана схема, приведенная на рис. 1.

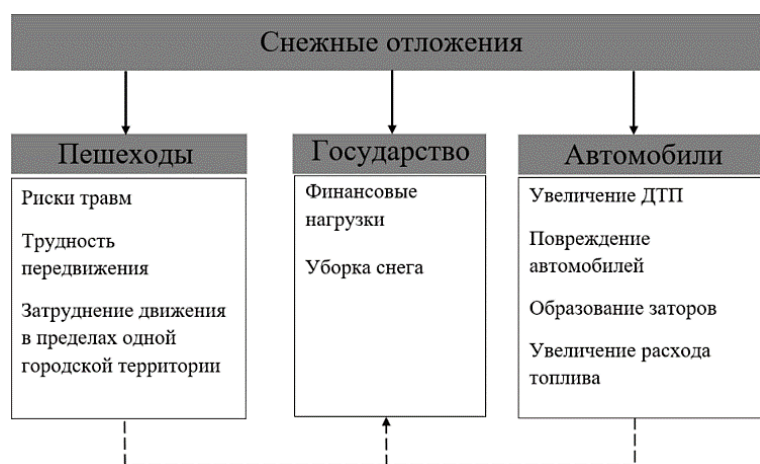


Рис. 1. Проблемы снежных отложений
Fig. 1. Challenges of snow deposits

Вследствие вышеуказанных факторов своевременная очистка дорог и прилегающих территорий от снежных заносов и валов является одним из важнейших мероприятий для поддержания безопасности и комфорта перемещения всех участников дорожного движения в зимний период.

Работники коммунальных служб, ответственные за уборку снега в непосредственной близости от жилых домов, часто формируют снег в снежные отвалы на окраинах дворовых территорий, в непосредственной близости к проезжей части. Подобные скопления снега значительно снижают обзор водителей, что может привести к дорожно-транспортным происшествиям как с участием автотранспорта, так и пешеходов.

Часто причиной хранения снега в указанных местах является отсутствие или неоптимальное расположение снежных полигонов [3], предусмотренных для хранения и утилизации снежно-ледовых накоплений с территории населенных пунктов, в том числе неочищенных масс с проезжей части и тротуаров и искусственно возведенных сооружений. Накопление снега на кромке проезжей части значительно сужает полосу движения, следовательно, для обеспечения безопасности транспортных средств необходимо оперативное его удаление. На автомобильных дорогах вне застроенной территории снег, как правило, удаляется в прилегающие кюветы и не требует вывоза.

Классификация снежных полигонов

На сегодняшний день существует несколько способов утилизации снега. В настоящем исследовании рассмотрены самые распространённые из них и выполнена их оценка (рис. 2).

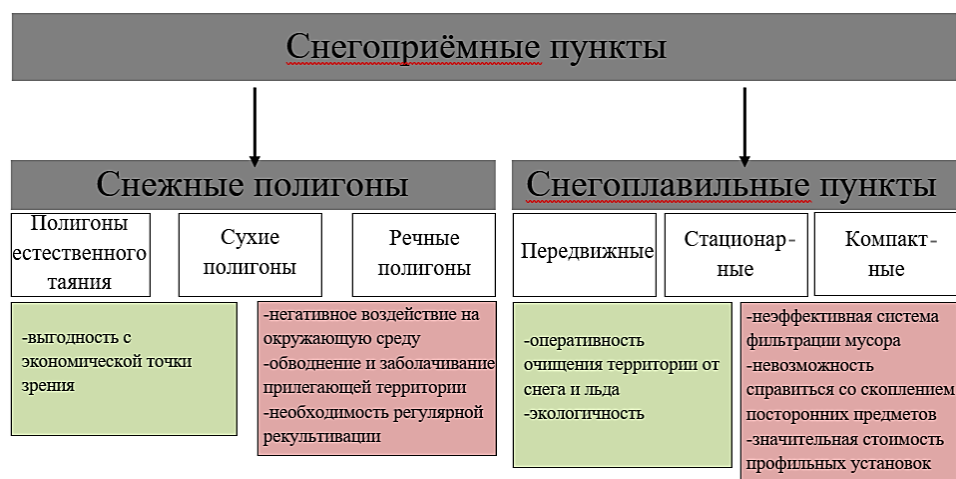


Рис. 2. Снегоприёмные пункты

Fig. 2. Snow polygons

Выявленные недостатки оказывают существенное влияние на эффективность работы снежных полигонов, приводя к невозможности своевременного доведения всех элементов дороги до надлежащего уровня содержания.

Обеспеченность снежными полигонами

В Российской Федерации снежные полигоны широко распространены в связи с экономической эффективностью и ввиду простоты их размещения в различных локациях города. Анализ обеспеченности крупных городов Российской Федерации снежными полигонами приведен в таблице.

Количество снежных полигонов в городах РФ

Snow polygons in Russian cities

Город	Количество полигонов	Среднее количество выпавшего снега, тыс. т	Средняя вместительность снежных полигонов, тыс. т/м ³
Москва	4	3974	6500
Санкт-Петербург	7	1705	1015
Казань	7	768	3000
Томск	3	382	600
Нижний Новгород	5	826	700
Пермь	5	526	3000
Ханты-Мансийск	1	426	700
Салехард	1	498	435
Уфа	11	520	400
Екатеринбург	7	521	380
Тамбов	3	356	400

Окончание таблицы
End of table

Город	Количество полигонов	Среднее количество выпавшего снега, тыс. т	Средняя вместительность снежных полигонов, тыс. т/м ³
Воронеж	6	436	300
Омск	5	550	1000
Тюмень	3	820	700
Ростов-на-Дону	11	400	500
Красноярск	4	352	100

Цветом в таблице выделены города, в которых объем выпавшего снега не соответствует вместимости существующих снежных полигонов, что вызывает необходимость корректировки ситуации, связанной с хранением и утилизацией снега. Одним из таких городов является Тюмень. В силу климатогеографических особенностей, быстрого роста численности населения и количества автомобилей, а также оперативности сбора натурных данных указанная городская территория выбрана для дальнейшего детального рассмотрения.

Модернизация снежного полигона в г. Тюмени

Тюмень является крупным транспортным узлом с развитой сетью внутренних улиц различных категорий и параметров. Суммарная протяженность дорог превышает 1000 км. Условия эксплуатации улично-дорожной сети, сформированные застройкой предыдущих лет, оказывают влияние на зимнее содержание дорожного хозяйства.

Плановое удаление снега с проезжей части улиц осуществляется автосамосвалами с погрузкой снегоуборщиком. В первую очередь удаление снега с поверхности проезжей части производится по маршрутам автобусного движения и на магистральных улицах общегородского назначения (улицы с наибольшей интенсивностью транспортных потоков). Мероприятия по зимнему содержанию осуществляются специализированными организациями, имеющими необходимый набор снегоуборочной техники.

В зависимости от интенсивности и вида осадков (снегопад, гололед) на проезжей части применяются специализированные очистительные машины (рис. 3). Снежная масса сдвигается к кромке покрытия в виде снежного вала, при необходимости с итерацией; затем поверхность покрытия обрабатывается противогололедными материалами [4] (в твердом виде – хлориды, в жидком – рассолы), что способствует достижению дополнительного эффекта в виде размельчения снежной массы (льда). Для повышения фрикционных свойств покрытия к материалу, расплавляющему лед, добавлен песок в нормированных пропорциях.

В результате указанных операций происходит трансформация льда или снега в рыхлую снежно-водяную массу, которая последующей операцией по очистке сдвигается механизмами в снежный вал к кромке покрытия. В результате формируется масса для транспортировки на снежный полигон, в составе которой присутствуют: соль, песок, лед как продукт таянья и привнесенные

компоненты от сгорания горюче-смазочных материалов, масла и др. При переработке указанной массы на полигоне требуется выделение твердого остатка и утилизация содержащихся в нем вредных веществ.



Рис. 3. Очистка дороги с использованием снегопогрузчика с автосамосвалом
Fig. 3. Snowloader with dump truck

Для размещения вывозимого снега с учетом минимизации затрат на транспортировку, возможности площадок и обеспечения принимаемой массы администрацией города выделены несколько территорий по направлениям от застройки: на запад (д. Воронино), на восток (д. Копытово) и на север (Велижанский тракт). Объем каждой площадки рассчитан на $500,0 \text{ т/м}^3$ снега. Предоставляемые территории, как правило, ранее использовавшиеся карьеры грунта, которые в настоящее время не производят разработку, т. е. представляют собой котлованы малой глубины.

За проанализированный трехлетний период складирование снега на указанных площадках выполнялось непосредственно на выровненную поверхность котлована (грунт – суглинок) [5]. Подъездная автомобильная дорога организована с учетом условий приемки снега. Периметр площадки обрамлен грунтовой дамбой для ограничения разлива воды в период таяния снежно-ледяной массы.

Привезенный автосамосвалами снег формируется бульдозером в штабель высотой до 10 м. Естественное таяние массы снега под воздействием положительной температуры и осадков происходит в весенне-летний период. По результатам наблюдений установлено, что в процессе постепенного таяния около 30 % воды испаряется, около 40 % фильтруется в грунт, а остаточный объем снежной воды должен быть перенаправлен в систему водоотвода. Наличие в привезенном с улиц города снеге загрязняющих компонентов (песок, хлориды, грязь, мусор и т. д.) при многолетней фильтрации в грунт через почву приводит к превышению предельно допустимых концентраций (ПДК) [6] вредных веществ, попадающих в прилегающие водоемы и другие водные объекты и территории [7].

Все вышеперечисленные факторы подтверждают необходимость организации поверхностного водоотвода в закрытую систему для последующей очистки.

С учетом требований экологии и минимизации выявленных проблем разработан проект по складированию снега, очистке талых вод и внедрению технологий снеготопления для снижения негативных последствий.

Первый из объектов (снежных полигонов) запроектирован и реализован в направлении на запад (д. Воронино) «Строительство сооружений – мест для складирования снега по адресу: г. Тюмень, проезд Воронинские горки».

Проектом предусмотрены:

- организация площадки для складирования снега. Снег, доставляемый самосвалами, размещается на замкнутой площадке, обвалованной грунтовой бермой, с покрытием из 2 слоев асфальтобетона на щебеночном основании, размещенном на песчаном слое толщиной 1,2 м по естественной грунтовой подше (суглинок тугопластичный);
- уклон всей поверхности площадки – 5 ‰, выполнен для движения воды от бурта снега к приемным лоткам в нижней точке. Вода собирается в колодец, откуда насосом перекачивается в действующую систему канализационно-насосной станции (КНС) хозяйственно-бытовых стоков [8], расположенную в непосредственной близости для перекачки в очистные сооружения Тюмени;
- подъездная автодорога и система учета по приему автосамосвалов на площадку с наружным освещением (рис. 4).

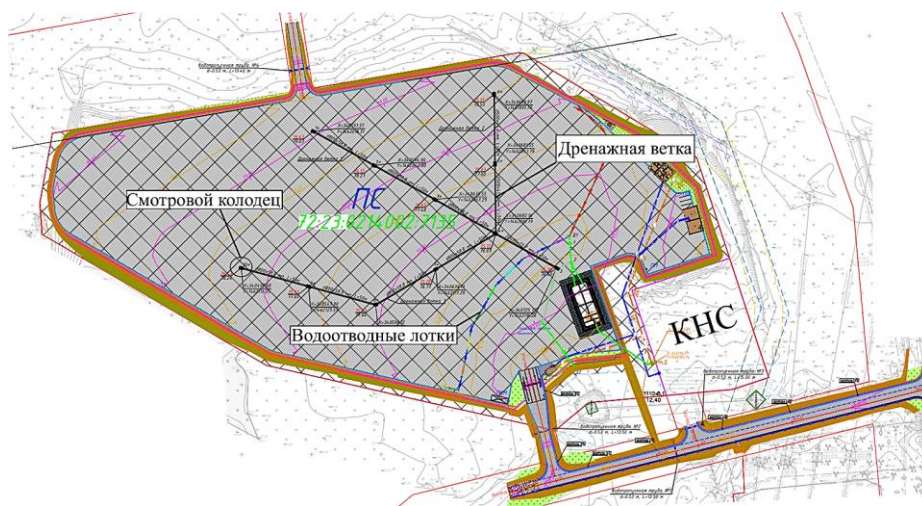


Рис. 4. Схема модернизированного снежного полигона

Fig. 4. Schematic of modernized snow polygon

При реализации проекта, где выполнены все предусмотренные проектом конструктивы и сооружения, были выявлены дополнительные факторы, оказывающие влияние на эксплуатационные характеристики разработанной конструкции. Они требуют специальных решений для повышения долговечности, удобства эксплуатации и сохранения в рабочем состоянии объекта:

- в зимний период: отрицательные температуры, изменяющаяся структура снега, его превращение в лед, а затем в воду с повторением циклов замерзания и оттаивания;
- в летний период: часть площади остается под снежной массой и замерзшим покрытием из асфальтобетона, на освободившейся территории наблюдается обводнение от растаявшего снега с проникновением воды в основание (рис. 5).



Рис. 5. Вид снежного полигона

Fig. 5. Snow polygon

Выявленные факторы приводят к снижению устойчивости и прочности асфальтобетона.

Для ликвидации негативных последствий в дополнение к стандартным проектным решениям авторами предложены следующие меры:

- устройство внутреннего ограждающего контура из тяжелых железобетонных блоков типа «Нью-Джерси» [9] (12-ДД-2010-0,55/2000П), ранее применявшихся в качестве парапетного ограждения на автодорогах. Блоки формируют внутренний ограждающий контур, обеспечивая технологический проезд и стекание воды к сборным лоткам для последующей откачки в систему КНС;

- согласно СП 34.13330.2021 (гл. 7, 8) следует обеспечивать необходимый размер превышения уровня покрытия над уровнем грунтовых вод или длительно (более 30 сут) стоящих поверхностных вод и т. д. При невозможности обеспечения требуемого возвышения предусмотрены специальные меры по урегулированию водно-теплого режима рабочего слоя;

- устройство дренажной системы (аналогично трубчатому перехватывающему дренажу на автодороге) под поверхностью покрытия площадки со снегом в виде сведенных в систему сборных коллекторов с колодцами. Коллекторы выполнены с использованием демонтированных пластиковых труб, с перфорацией и обмоткой нетканым материалом, а колодцы – из сборных блоков ФБС для долговечности и устойчивости к агрессивной воде с хлоридами. Дренажная система является самотечной и подключена к системе поверхностного водоотвода, приходящей в сборную емкость, предусмотренную в проекте.

На объекте учтены факторы, являющиеся ключевыми для конкретных условий:

- наличие водоупорного слоя под конструкцией площадки (в виде суглинка тугопластичного), препятствующего дренированию получаемой от тая-

ния воды в нижележащие грунты. Проникшая вода остается в основании, что приводит к переувлажнению в рабочем слое земляного полотна и снижению прочностных характеристик и несущей способности всей конструкции;

– дренажная система обеспечивает отвод воды из слоев основания и тела земляного полотна как при наличии снега, так и после его таяния;

– линия железобетонных блоков по внутреннему контуру позволяет увеличить высоту складированного снега и организовать проезд по периметру склада. Между блоками и границей площадки возможно удаление твердого остатка, поэтапно без нарушения целостности общего склада;

– неравномерность притока воды, вызванная различными погодными факторами (дождь или солнечные дни), оказывает влияние на объем стока с поверхности. Однако существует возможность регулирования количества отвода воды в систему очистки путем временного сохранения запаса воды при больших объемах стока.

Заключение

В результате выполненного исследования проанализированы классификация и обеспеченность снежными полигонами городов Российской Федерации, а также выявлены недостатки функционирования существующих полигонов. На основе проведенного анализа была разработана и успешно внедрена модернизированная версия снежного полигона, имеющая ряд преимуществ. Главным элементом проекта является дренажная система, обеспечивающая отвод талых вод из основания дорожной одежды и предотвращение их фильтрации в грунт. Кроме того, она обеспечивает возможность поэтапного удаления твердого остатка при наличии общего склада снега и в случае его отсутствия.

Таким образом, благодаря данной разработке решены следующие типичные проблемы: негативное воздействие на окружающую среду, обводнение и заболачивание прилегающей территории, необходимость регулярной рекультивации. Предложенная модернизация обеспечивает долгосрочный экономический эффект за счет снижения эксплуатационных затрат и увеличения срока службы объекта. Предложено использование разработанной усовершенствованной версии снежных полигонов на территории других городов Российской Федерации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Павлова Л.Н., Коннов Д.А. Способы защиты автомобильных дорог от снежных заносов // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 99-8. С. 64–67. DOI: 10.18411/trnio-07-2023-434. EDN: WNPKNB
2. Бурлуцкий А.А., Ромашова А.А. Обзор технологий сбора данных о параметрах движения городских транспортных потоков // Избранные доклады 67-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 19–23 апреля 2021 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 220–223. EDN EXCEZR
3. Карачевцев Д.Р. Снежный полигон как способ складирования снежной массы // Молодежь и системная модернизация страны : сборник научных статей 4-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Курск, 21–22 мая 2019 г. Том 4. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 305–308. EDN: WSWSDY
4. Овчинников А.А., Лучинский Д.П., Тимоховец В.Д. Повышение качества содержания улиц и городских дорог с учетом климато-географических условий г. Тюмени // Инновации

- и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии) : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, 18–19 ноября 2021 г. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 61–67. EDN: IMRHEX
5. Сухоруков А.В., Бадина М.В., Чурилин В.С., Сиволан В.Е. Анализ переменных, влияющих на изменение коэффициента влагопроводности глинистых грунтов // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9. № 4. DOI: 10.15862/08SATS422. EDN: CJMIXO
 6. Chichigina Ya.M., Shigabaeva G.N., Emelyanova E.A., Galunin E.V., Yakimov A.S., Isaev A.Yu., Bekker M.R. Heavy metal contents in the Tyumen city residential area soils // Journal of advanced materials and technologies. 2023. V. 8. № 2. P. 141–156. DOI: 10.17277/jamt.2023.02.pp.141-156. EDN: SKTPEO
 7. Ягафаров С.А., Чистякова Н.Ф. Геоэкологическая оценка почв территории снежных полигонов (на примере г. Тюмень) // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина, Томск, 08–12 апреля 2019 г. В 2 томах. Том 1. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. С. 655–656. EDN: FQAZGJ
 8. Воронов А.А., Максимова С.В. Утилизация талых вод снежных полигонов // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, Тюмень, 21–23 декабря 2020 г. Том II. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. С. 108–111. EDN: PODSIL
 9. Бессонов А.С. Современные методы восстановления и ремонта парапетных ограждений типа «Нью-Джерси» // Перспективы науки. 2019. № 9 (114). С. 23–27.

REFERENCES

1. Pavlova L.N., Konnov D.A. Road Protection from Snow Drifts. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2023; (99-8): 64–67. DOI: 10.18411/trnio-07-2023-434 EDN: WNPKEB (In Russian)
2. Burluczkiy A.A., Romashova A.A. Analysis of Technologies for Collecting Data on Traffic Flow Parameters. In: *Selected Papers 67th University Sci. Conf. of Students and Young Scientists*, in 3 vol. Tomsk: TSUAB, 2021. Pp. 220–223. (In Russian)
3. Karachevcev D.R. Snow Polygon as a Way of Snow Mass Storage. In: *Proc. 4th Int. Conf. of Students and Young Scientists 'The Youth and Systems Modernization of the Country'*. Kursk: South-West State University, 2019. Pp. 305–308. (In Russian)
4. Ovchinnikov A.A., Luchinskij D.P., Timoxovets V.D. Quality Improvement of Street and Urban Road Maintenance in Tyumen Climatic and Geographical Conditions. In: *Proc. 4th All-Russ. Sci. Conf. 'Innovations and Durability of Transport Infrastructure Objects'*, Saint-Petersburg, 2022. Pp. 61–67. (In Russian)
5. Suhorukov A.V., Badina M.V., Churilin V.S., Sivolap V.E. Variables Affecting Moisture Conductivity Coefficient of Clayey Soils. *Transportnye sooruzheniya*. 2022; 9 (4). DOI: 10.15862/08SATS422. EDN: CJMIXO (In Russian)
6. Chichigina Ya.M., Shigabaeva G.N., Emelyanova E.A., Galunin E.V., Yakimov A.S., Isaev A.Yu., Bekker M.R. Heavy Metal Contents in the Tyumen City Residential Area Soils. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2023; 8 (2): 141–156. DOI: 10.17277/jamt.2023.02.pp.141-156. EDN: SKTPEO
7. Yagafarov S.A., Chistyakova N.F. Geoecological Assessment of Soils on Snow Polygon Territory (the Tyumen case study). In: *Proc. 23rd Int. Symp. 'Problems of Geology and Subsoil Development'*, in 2 vol. Tomsk: TPU, 2019. Pp. 655–656. (In Russian)
8. Voronov A.A., Maksimova S.V. Utilisation of Snow Landfill Melt Water. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Energy Saving and Innovative Technologies in Fuel and Energy Complex'*. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2020. Pp. 108–111. (In Russian)
9. Bessonov A.S. Modern Methods of Restoration and Repair of Parapet Fences of 'New Jersey' Type. *Perspektivy nauki*. 2019; 9 (114): 23–27. (In Russian)

Сведения об авторах

Лучинский Дмитрий Павлович, заместитель главного инженера АО «Мостострой-11», 652000, г. Тюмень, ул. Смоленская, 41, luchinskiyd@mail.ru

Тимоховец Вера Дмитриевна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 652000, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, timohovetsvd@tyuiu.ru

Швырёв Максим Владимирович, студент, Тюменский индустриальный университет, 652000, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, maksim.902016@yandex.ru

Authors Details

Dmitrii P. Luchinskii, Deputy Chief Engineer, AO "Mostostroy-11", 41, Smolenskaya Str., 652000, Tyumen, Russia, luchinskiyd@mail.ru

Vera D. Timohovets, PhD, A/Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, timohovetsvd@tyuiu.ru

Maksim V. Shvyryov, Student, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, maksim.902016@yandex.ru

Вклад авторов

Лучинский Д.П. – научное руководство, концепция исследования, реализация проекта.

Тимоховец В.Д. – научное руководство, доработка текста.

Швырёв М.В. – участие в реализации проекта, написание исходного текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Luchinskij D.P. – supervision, conceptualization, project implementation.

Timohovets V.D. – supervision, editing manuscript.

Shvyryov M.V. – project implementation, writing–original draft preparation; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025
Одобрена после рецензирования 17.04.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 04.02.2025
Approved after review 17.04.2025
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 280–291.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 280–291.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131.54:001.891.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291

EDN: WUXJGZ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ

**Александр Дмитриевич Башарин, Владимир Сергеевич Чурилин,
Алексей Владимирович Сухоруков, Мария Владимировна Бадина**
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* В Указе Президента Российской Федерации № 309 от 7 мая 2024 г. «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г.» определены показатели для достижения национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни». Согласно документу, к 2030 г. доля автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям, должна составить: для дорог федерального значения и крупнейших городских агломераций – не менее 85 %; для опорной сети автомобильных дорог – не менее 85 %; региональных или межмуниципальных дорог – не менее 60 %. Однако для Западной Сибири существуют риски недостижения установленных показателей из-за недостаточного учета пучинистых свойств глинистых грунтов земляного полотна. Изменения в ГОСТ 28622–2012, внесенные в 2022 г., и появление новой приборной базы для оценки степени пучинистости грунтов обуславливают необходимость сопоставления результатов исследований, выполненных с применением различного оборудования.

Цель исследования: выполнить анализ результатов лабораторных испытаний степени пучинистости грунтов на установках различной конструкции для оценки целесообразности объединения их в единую генеральную совокупность.

Методы исследования включают сравнительные испытания на приборах различной конструкции, а также применение методов математической статистики для обработки и сопоставления полученных результатов.

Результаты. Выявлены существенные различия в результатах испытаний на установках ППГ1-М и ГТ 1.1.8. Показано, что объединение данных, полученных на разных установках, в единую генеральную совокупность для выявления новых связей и закономерностей нецелесообразно.

Ключевые слова: автомобильные дороги, морозное пучение грунтов, глинистый грунт, степень пучинистости

Для цитирования: Башарин А.Д., Чурилин В.С., Сухоруков А.В., Бадина М.В. Анализ результатов лабораторных испытаний морозного пучения грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 280–291. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291. EDN: WUXJGZ

ORIGINAL ARTICLE

LABORATORY TESTS OF SOIL FROST HEAVING

Aleksandr D. Basharin, Vladimir S. Churilin,

Aleksei V. Sukhorukov, Mariya V. Badina

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. In Presidential Decree No. 309 of the Russian Federation, approved on 7 May 2024, “On the National Development Goals of the Russian Federation for the Period until 2030 and the Prospect until 2036”, the President decides to establish targets and objectives, the achievement of which must demonstrate the achievement of the comfortable and safe living environment. According to the document, by 2030 the share of roads that meet regulatory requirements should be at least 85 % for federal roads and major urban agglomerations, at least 85 % for the backbone road network, at least 60 % for regional or inter-municipal roads. However, for Western Siberia, there are risks of not achieving the established indicators due to insufficient consideration of heaving properties of subgrade soils. Changes to GOST 28622–2012 introduced in 2022 and the emergence of the new instrumentation base for assessing the degree of soil heaving necessitate a comparison of the results obtained by different equipment.

Purpose: The analysis of laboratory test results of soil heaving on installations of various design to assess the feasibility of combining them into a single general set.

Methodology: Comparative tests on devices of different design, methods of mathematical statistics for processing and comparing the obtained results.

Research findings: Significant differences in the test results obtained on different installations are demonstrated. It is shown that combining data obtained on different installations into a single general population to identify new relationships and patterns is inappropriate.

Keywords: automobile road, frost heaving, clay soil, soil swelling

For citation: Basharin A.D., Churilin V.S., Sukhorukov A.V., Badina M.V. Laboratory Tests of Soil Frost Heaving. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 280–291. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291. EDN: WUXJGZ

Под морозным пучением понимают деформирование промерзающих увлажненных грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации поровой и мигрирующей воды с образованием кристаллов и линз льда¹.

Морозное пучение грунтов определяется комплексным воздействием факторов, развитие которых вызвано геологическими, климатическими и гидрогеологическими условиями. К значимым факторам, определяющим интенсивность пучения грунта, относятся: гранулометрический, минералогический и химический состав, физико-механические характеристики, плотность, уровень залегания грунтовых вод в период промерзания, масса вышерасположенных слоев дорожной конструкции, температурные параметры, зависящие от зимних температур воздуха и теплоизоляционных свойств поверхности грунта². Вопросы количественной оценки характеристик морозного пучения грунтов исследованы в работах таких ученых, как Ю.М. Васильев, И.А. Золотарь, В.О. Орлов,

¹ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

² Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. Москва: Стройиздат, 1986. 72 с.

Н.А. Пузаков, Х.Р. Хакимов и др. [1]. В частности, согласно классификационной системе А. Касагранде [2], к категории морозоопасных грунтов относятся неоднородные грунты с содержанием фракций менее 0,02 мм свыше 3 % от общей массы и однородные грунты с долей частиц менее 0,02 мм более 10 % [2]. К данной категории, согласно этой классификации, могут быть отнесены пылеватые супеси, суглинки и пылеватые глины при близком залегании грунтовых вод. Однако классификация морозоопасности грунтов на основе их гранулометрического состава и показателей пластичности позволяет выявить лишь заведомо непучинистые или потенциально пучинистые грунты [3].

Недостаточный учет степени морозного пучения грунтов земляного полотна, а также несвоевременная реализация мероприятий, направленных на обеспечение морозоустойчивости дорожных конструкций, могут привести к снижению устойчивости земляного полотна, сокращению межремонтных сроков и ухудшению эксплуатационных характеристик автомобильных дорог [4]. Это, в свою очередь, вызывает возникновение незапланированных затрат финансовых ресурсов [5, 6]. Согласно исследованиям А.Я. Тулаева [7], истоки борьбы с деформациями грунтов на дорогах Российской империи приходится на конец первой половины XIX в., когда при отсыпке и устройстве «мостовых дорог» начали осуществлять простейшие конструктивные мероприятия. Несмотря на длительный период изучения процессов морозного пучения, данная проблематика сохраняет свою актуальность, и современные исследователи [8, 9, 10] продолжают проводить работы, направленные на прогнозирование и углубленное понимание поведения грунтов в условиях сезонного промерзания.

Для обеспечения межремонтных сроков автомобильных дорог, установленных в ГОСТ Р 58861–2020³, необходимо выполнить расчеты на морозоустойчивость дорожных конструкций в соответствии с требованиями ГОСТ Р 71404–2024⁴ для районов сезонного промерзания грунтов.

Морозоустойчивость дорожных конструкций рассчитывается исходя из степени пучинистости грунта, которая оценивается согласно требованиям ГОСТ 25100–2020⁵ на основе значения относительной деформации морозного пучения. Значение относительной деформации получают путем проведения испытаний с применением специализированных приборов, обеспечивающих вертикальное промораживание образцов исследуемого грунта в заданных температурных и влажностных условиях с возможностью внешнего массообмена под компрессией. При испытании измеряются вертикальные перемещения (деформации) поверхности образца в соответствии с ГОСТ 28622–2012⁶.

Лабораторные испытания для определения степени морозного пучения грунта впервые были обоснованы Ю.М. Васильевым в 1965 г. [11]. В исследовании [12] проведено сопоставление результатов испытаний пучинистых свойств

³ ГОСТ Р 58861–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков. Москва: Стандартинформ, 2020. 20 с.

⁴ ГОСТ Р 71404–2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2024. 147 с.

⁵ ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация (с Поправкой). Москва: Стандартинформ, 2020. 41 с.

⁶ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

грунта на приборах Ю.М. Васильева, ОСПГ и ППГ-1М. В результате сопоставительных испытаний выявлены незначительные расхождения в пучинистых свойствах грунта (отклонение составляет 3 %). Исходя из результатов испытаний М.В. Бадиной [12] в качестве первого прибора для проведения сопоставительных испытаний принят прибор ППГ-1М (рис. 1).

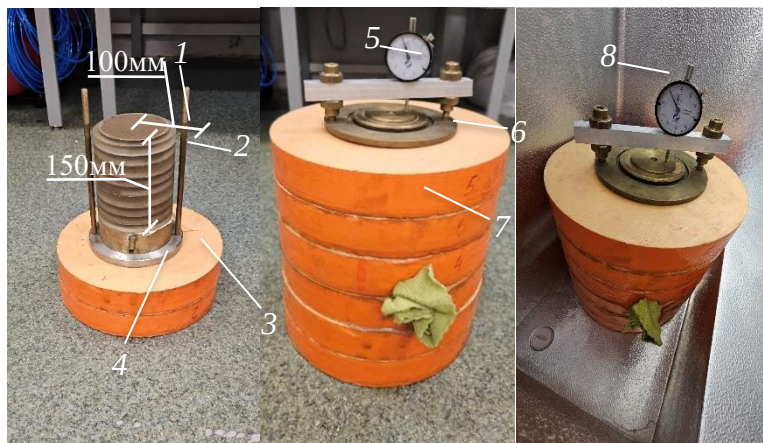


Рис. 1. Общий вид и конструкция прибора ППГ-1М для определения степени пучинистости грунта по ГОСТ 28622–2012⁷

Fig. 1. General view and design of the PPG-1M device for soil heaving measurement according to GOST 28622–2012

Вторым прибором для проведения и сопоставления результатов определения степени пучинистости грунта принят прибор ГТ 1.1.12 (НПП «ГЕОТЕК», рис. 2), соответствующий ГОСТ 28622–2012⁸ с изменениями 2022 г. В данном документе приложение со схемой установки степени морозного пучения переведено из рекомендуемого в обязательное, с контролем датчика температуры на нижнем торце образца.

В состав прибора ППГ-1М (рис. 1) входят следующие элементы: 1 – образец испытуемого грунта; 2 – обойма из поликарбоната; 3 – стакан с капиллярно-пористым материалом; 4 – устройство для подачи воды; 5 – индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; 6 – штамп; 7 – теплоизоляционный кожух из экструдированного пенополистирола; 8 – климатический ларь.

В состав прибора ГТ 1.1.8 НПП «ГЕОТЕК» входят следующие элементы: 1 – образец испытуемого грунта; 2 – обойма из поликарбоната; 3 – стакан с капиллярно-пористым материалом; 4 – S-образный датчик силоизмерительный; 5 – верхняя термоплита; 6 – нижняя термоплита; 7 – датчик линейных вертикальных перемещений; 8 – теплоизоляционный кожух из вспененного полиэтилена; 9 – датчик температуры; 10 – устройство для подачи воды; 11 – шкаф управления; 12 – климатическая камера.

⁷ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

⁸ Там же.

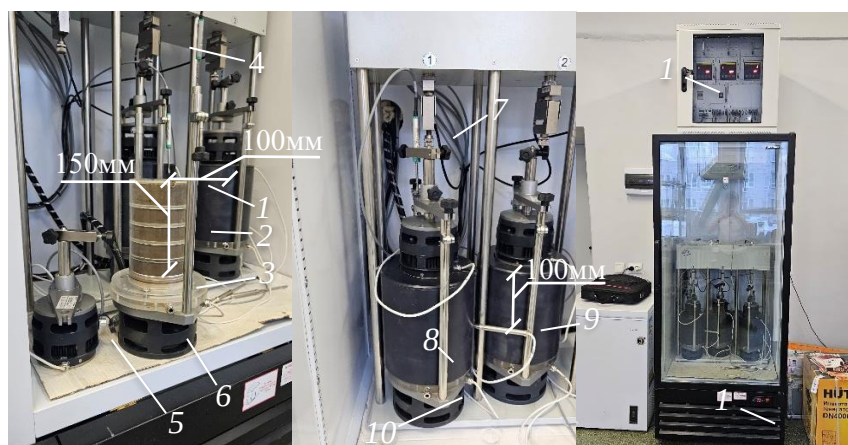


Рис. 2. Общий вид и конструкция прибора ГТ 1.1.8 НПП «ГЕОТЕК» для определения степени пучинистости грунта по ГОСТ 28622–2012⁹

Fig. 2. General view and design of the GT 1.1.8 NPP "GEOTEK" for soil heaving measurement according to GOST 28622–2012

Для сопоставительных испытаний отобран грунт – пылеватый суглинок, характерный для земляного полотна автомобильных дорог Западно-Сибирского региона, согласно результатам исследований В.Н. Ефименко и С.В. Ефименко [13, 14]. Отбор проб грунта произведен из рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги в пос. Лоскутово Томской области с соблюдением требований ГОСТ 12071–2014¹⁰. Лабораторные исследования свойств грунта выполнены с соблюдением правил ГОСТ 33063–2014¹¹ и ГОСТ 30416–2020¹². Параметры, характеризующие свойства исходного грунта, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований свойств грунта

Table 1

Laboratory studies of soil properties

Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	Влажность, д. ед.	Плотность грунта ρ , г/см ³	Плотность сухого (скелета) грунта ρ_s , г/см ³	Влажность на границе текучести w_L , ед.	Влажность на границе раскатывания w_p , ед.	Число пластичности I_p , ед.	Показатель текучести I_L , ед.
2,60	0,151	2,16	1,80	0,25	0,17	0,08	< 0

⁹ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

¹⁰ ГОСТ 12071–2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Москва: Стандартинформ, 2019. 12 с.

¹¹ ГОСТ 33063–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Классификация типов местности и грунтов. Москва: Стандартинформ, 2016. 54 с.

¹² ГОСТ 30416–2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения (с Поправкой). Москва: ФГБУ «РСТ», 2021. 22 с.

Таблица 2

Гранулометрический состав грунта

Table 2

Grain size distribution

Размер фракции в мм; содержание, %					
0,5–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	< 0,005
13,36	9,97	18,32	41,20	7,37	9,78

Методом стандартного уплотнения, регламентированным ГОСТ 22733–2016, была определена оптимальная влажность для пылеватого суглинка, составившая 16,5 %, при которой достигается максимальная плотность сухого грунта. Для проведения одного испытания масса подготовленного грунта составляла 3565 г, высушенного до постоянной массы. Для достижения оптимальной влажности 16,5 % добавлялось рассчитанное количество воды – около 585 г (с учетом потери влаги при испарении). Вода вводилась в несколько этапов при непрерывном перемешивании грунта металлическим шпателем. После этого подготовленный грунт помещался в эксикатор и выдерживался не менее 12 ч (в данном случае 24 ч, рис. 3) с соблюдением требований ГОСТ 22733–2016¹³.



Рис. 3. Внешний вид увлажненного грунта суглинка пылеватого в эксикаторе

Fig. 3. Moistened silty loam soil in a desiccator

По истечении 24 ч образец грунта нарушенного сложения готовился при оптимальной влажности методом послойного трамбования в обойме с соблюдением правил ГОСТ 22733–2016¹⁴. Подготовленный образец грунта помещался в испытательное оборудование на капиллярно-пористый материал, после чего устанавливались датчики вертикальных деформаций грунта и термодатчики в образец. Начальные показания измерительных устройств фиксировались с соблю-

¹³ ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности (с Поправками). Москва: Стандартинформ, 2019. 15 с.

¹⁴ Там же.

дением требований ГОСТ 28622–2012¹⁵. Термостатирование испытуемых образцов выполнялось в климатической камере при температурном режиме $(1 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ в течение не менее 24 ч, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 28622–2012. После термостатирования включалось устройство для создания, поддержания и контроля заданных температурных условий промораживания образца грунта. На верхнем торце образца грунта температура задавалась минус $(4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$, на нижнем – плюс $(1 \pm 0,2)^\circ\text{C}$. Прибор ГТ 1.1.8 обеспечивал поддержание данной температуры за счет автоматизированного режима. В случае использования прибора ППГ-1М температура регулировалась через климатическую камеру при помощи циркуляционного термостата. Заданные температурные параметры на верхнем и нижнем торцах образца обеспечивали скорость перемещения фронта промерзания, аналогичную природным условиям. Испытание проводилось без притока влаги, имитируя глубокое залегание грунтовых вод.

Промораживание испытуемого образца грунта прекращалось при достижении 0°C на глубине $2/3$ высоты образца. Прибор ГТ 1.1.8 автоматически завершал испытание при достижении заданной глубины промерзания. Для прибора ППГ-1М отсутствует возможность отслеживания глубины промерзания, поэтому испытание продолжалось до полного промораживания образца, что допускается ГОСТ 28622–2012¹⁶. После окончания испытания снимались показания вертикальной деформации с датчиков, образец грунта извлекался из обоймы, производилась фотофиксация и взвешивание образца (рис. 4, 5).

Затем образец грунта помещался в нагретый сушильный шкаф и высушивался до постоянной массы при температуре $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$, после чего проводилось его взвешивание и определение влажности согласно ГОСТ 5180–2015¹⁷.

Испытания проводились на трех последовательных образцах исследуемого грунта. Относительная деформация морозного пучения образца грунта ε_{fn} вычислялась с точностью 0,01 по формуле

$$\varepsilon_{fn} = \frac{h_f}{d_i},$$

где h_f – вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм; d_i – толщина промерзшего слоя образца грунта за вычетом h_f , мм.

Результаты лабораторных испытаний грунта для определения степени морозного пучения приведены в табл. 3, а также построен график зависимости вертикальной деформации h_f , мм, от времени t , ч, для пылеватого суглинка на основе данных, полученных с прибора ГТ 1.1.8 (рис. 6).

Средняя относительная величина морозного пучения грунта по серии испытаний (табл. 3) на приборе ГТ 1.1.8 составила 0,018 д. е., на приборе ППГ-1М – 0,0099 д. е. Относительная погрешность между результатами испытаний

¹⁵ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

¹⁶ Там же.

¹⁷ ГОСТ 5180–2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик (с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2016. 23 с.

на приборах различной конструкции на морозное пучение грунта составила 45 %. Расчет погрешности проводится относительно «эталонного» значения, полученного на приборе ГТ 1.1.8, который соответствует новой редакции ГОСТ 28622–2012¹⁸ с изменениями 2022 г.



Рис. 4. Общий вид образца грунта после промораживания на приборе ППГ-1М

Fig. 4. Soil sample after freezing on the PPG-1M device



Рис. 5. Общий вид образца грунта после окончания испытания на приборе ГТ 1.1.8 и высушивания до постоянной массы

Fig. 5. Soil sample after testing on the GT 1.1.8 device and drying to constant weight

Таблица 3

**Результаты лабораторных испытаний грунта
на относительную деформацию морозного пучения**

Table 3

Laboratory tests of soil relative strain by frost heaving

Прибор	ГТ 1.1.8			ППГ-1М		
Номер испытания	1	2	3	1	2	3
Влажность, %	13	14	16,7	13	14	16,4
Вертикальная деформация образца грунта в конце испытания h_f , мм	1,8	1,8	1,9	1,46	1,48	1,50
Толщина промерзшего слоя образца грунта за вычетом h_f , d_i , мм	100	100	100	150	150	150
Относительная деформация морозного пучения $\varepsilon_{fn} = \frac{h_f}{d_i}$	0,018	0,018	0,019	0,0098	0,0099	0,010
$\varepsilon_{fn_{cp}}$	0,018			0,0099		

¹⁸ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

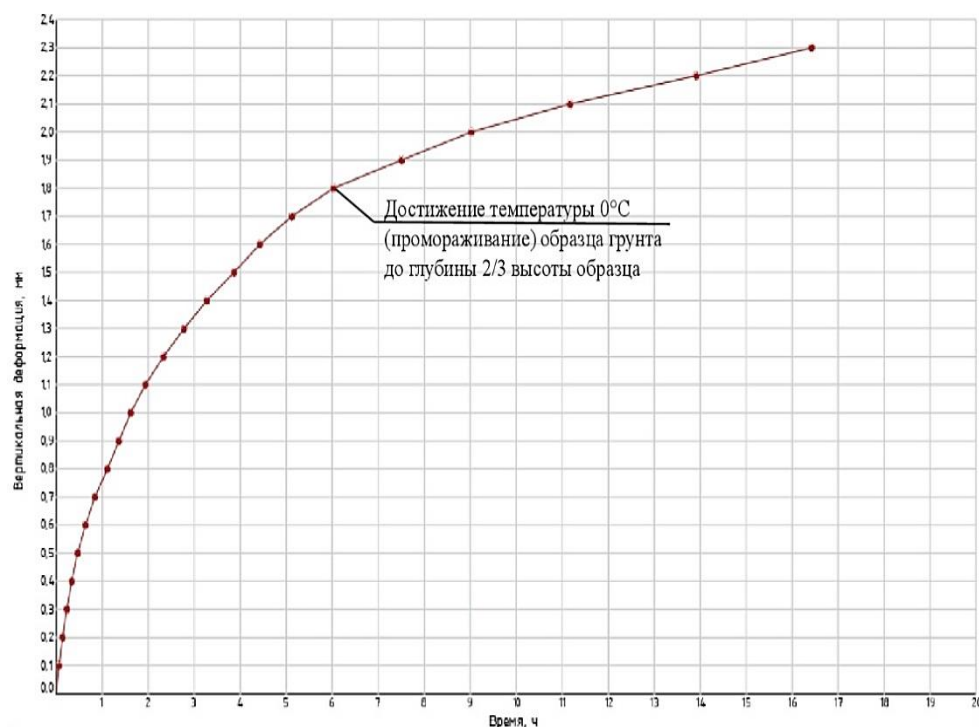


Рис. 6. График зависимости вертикальной деформации от времени на приборе ГТ 1.1.8

Fig. 6. Time dependence of vertical strain obtained by the GT 1.1.8 device

Общий вид зависимости (рис. 6) вертикальной деформации морозного пучения грунта от времени, полученной на приборе ГТ 1.1.8, качественно совпадает с результатами исследования R.J. Kettle и R.I.T. Williams [15], которые также анализировали различия в значениях величины морозного пучения грунта, полученных на приборах различных конструкций.

Выводы

В ходе выполненной работы были проведены лабораторные испытания по определению величины морозного пучения грунта без притока влаги на приборах конструкции ППГ-1М и ГТ 1.1.8. Установлены существенные различия в результатах: относительная погрешность по средним значениям серии испытаний (3 образца) составила 45 %.

Следовательно, объединять результаты испытаний, выполненных ранее на приборе ППГ-1М, с результатами прибора ГТ 1.1.8 в единую генеральную совокупность для выявления новых связей и закономерностей нецелесообразно. Значительные отличия в величине относительной деформации морозного пучения грунта могут быть обусловлены различиями в режимах промерзания образцов, что было отмечено ранее в исследовании [15]. Поэтому при исследовании величины относительной деформации морозного пучения грунта на приборах различной конструкции необходимо уделять особое внимание контролю температурного градиента и режиму промерзания образцов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1977. 184 с.
2. Casagrande A. Discussion of Frost Heaving // Highway Research Board Proceedings. 1931. V. 11. P. 168–172.
3. Невзоров А.Л., Болдырев Г.Г., Скопинцев Д.Г. Определение деформаций морозного пучения грунтов в лабораторных условиях // Геотехника. 2014. № 3. С. 26–31. EDN: TCYVZD
4. Afridi M.A., Erlingsson, S., Sjögren, L. Municipal street maintenance challenges and management practices in Sweden. *Frontiers in Built Environment*. 2023. V. 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1205235. EDN: LTNTPE
5. Фурман Б.В., Ярмолинский А.И. Причины и способы борьбы с морозным пучением на автомобильных дорогах // Материалы 57-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ, Хабаровск, 17–27 апреля 2017 г. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2017. С. 323–329. EDN: YTGFDH
6. Чурилин В.С., Базуев В.П., Бадина М.В. Некоторые результаты испытания пучинистых свойств глинистых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6 (47). С. 191–196. EDN: TBZJNH
7. Тулаев А.Я. Обзор литературных работ, посвященных изучению пучин и мерам борьбы с ними, опубликованных до 1938 года // ДорНИИ, Исследование пучин на автомобильных дорогах : сб. научных трудов. Вып. 11. Москва : Дориздат, 1941. С. 13–86.
8. Zhou S., Zhou C., Sun Y., et al. Predicting mechanical properties of freeze-thaw clay under varying compaction levels and confining pressures utilizing GA-BP network and machine learning-aided Duncan-Chang constitutive model // *Environ Earth Sci*. 2025. № 84. P. 331. DOI: 10.1007/s12665-025-12346-6
9. Sun Y., Meng S., Wang M., et al. Deterioration effect of freeze-thaw on mechanical properties of roadbed clay under unfavorable conditions // *Bull. Eng. Geol. Environ*. 2021. № 80. P. 4773–4790. DOI: 10.1007/s10064-021-02203-8. EDN: PXLBUJ
10. Isakov A., Bukhov S. Estimation of the Height of Frost Heaving of Clayey Soil of the Subgrade in a Closed System of Freezing // *International Journal of Geomechanics*. 2023. V. 23. № 7. P. 04023096. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-7710. EDN: GPXCPS
11. Васильев Ю.М. Расчет морозозащитных слоев дорожных одежд городских дорог. Ленинград : Автотрансиздат, 1965. 111 с.
12. Бадина М.В. Лабораторные исследования величины морозного пучения грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 3 (24). С. 150–156. EDN: KXDSWD
13. Ефименко В.Н. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог при глубоко промерзании грунтов (На примере Юго-Востока Западной Сибири) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ефименко Владимир Николаевич. Москва, 1978. 216 с.
14. Ефименко С.В. Развитие теоретических положений учета особенностей признаков геокмплекса при формировании региональных норм проектирования автомобильных дорог : специальность 05.23.11 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ефименко Сергей Владимирович. Новосибирск, 2016. 462 с. EDN: QOZNUW
15. Kettle M.R.J., Williams R.I.T. Frost heave testing // *Matériaux et Constructions*. 1976. V. 9 (4). P. 310.

REFERENCES

1. Orlov V.O., Dubnov Yu.D., Merenkov N.D. Swelling of Freezing Soils and its Influence on Foundations. Leningrad: Stroyizdat, 1977. 184 p. (In Russian)
2. Casagrande A. Discussion of Frost Heaving. *Highway Research Board Proceedings*. 1931; 11: 168–172.
3. Nevzorov A.L., Boldyrev G.G., Skopincev D.G. Determination of Frost Heave Deformations of Soils in Laboratory Conditions. *Geotekhnika*. 2014; (3): 26–31. EDN: TCYVZD (In Russian)

4. Afridi M.A., Erlingsson S., Sjögren L. Municipal Street Maintenance Challenges and Management Practices in Sweden. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9-2023. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1205235
5. Furman B.V., Yarmolinskii A.I. Causes and Methods of Combating Frost Heaving on Highways. In: *Proc. 57th Sci. Conf. of Students*, 17–27 April. Habarovsk, 2017. Pp. 323–329. (In Russian)
6. Churilin V.S., Bazuev V.P., Badina M.V. Test Results of Clayey Soil Heaving Properties. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014; (6): 191–196. (In Russian)
7. Tulaev A.Ya. Literature Review of Sloughs and Slough Control Measures Published Before 1938. In: *Proc. DornII, Issledovanie puchin na avtomobilnyh dorogah*, Moscow: Dorizdat, 1941, Pp. 13–86. (In Russian)
8. Zhou S., Zhou C., Sun Y., et al. Predicting Mechanical Properties of Freeze-Thaw Clay under Varying Compaction Levels and Confining Pressures Utilizing GA-BP Network and Machine Learning-Aided Duncan-Chang Constitutive Model. *Environmental Earth Sciences*. 2025; 84: 331. DOI: 10.1007/s12665-025-12346-6
9. Sun Y., Meng S., Wang M., et al. Deterioration Effect of Freeze-Thaw on Mechanical Properties of Roadbed Clay under Unfavorable Conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021; 80: 4773–4790. DOI: 10.1007/s10064-021-02203-8
10. Isakov A., Bukhov S. Estimation of the Height of Frost Heaving of Clayey Soil of the Subgrade in a Closed System of Freezing. *International Journal of Geomechanics*. 2023; 23 (7): 04023096. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-7710
11. Vasilev Yu.M. Calculation of Frost Protection Layers of Urban Road Pavements. Leningrad: Avtotransizdat, 1965. 111 p. (In Russian)
12. Badina M.V. Laboratory Studies of Soil Frost Heaving. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; 3 (24): 150–156. (In Russian)
13. Efimenko V.N. “Water-heat regime of motorway subgrade at deep freezing of soils (on the example of South-East of Western Siberia)”. PhD Thesis. Moscow, 1978. 216 p. (In Russian)
14. Efimenko S.V. “Development of theoretical provisions for taking into account the features of geocomplex attributes in the formation of regional norms of motorway design”. DSc Thesis. Novosibirsk, 2016. 462 p. (In Russian)
15. Kettle M.R.J., Williams R.I.T. Frost Heave Testing. *Matériaux et Constructions*. 1976; 9 (4): 310.

Сведения об авторах

Башарин Александр Дмитриевич, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, basharin.2001@inbox.ru

Чурилин Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lex-16-2008@mail.ru

Сухоруков Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, av_suhar@mail.ru

Бадина Мария Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, mvbadina@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr D. Basharin, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, basharin.2001@inbox.ru

Vladimir S. Churilin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lex-16-2008@mail.ru

Aleksei V. Sukhorukov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, av_suhar@mail.ru

Mariya V. Badina, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mvbadina@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.06.2025
Одобрена после рецензирования 30.06.2025
Принята к публикации 01.07.2025

Submitted for publication 20.06.2025
Approved after review 30.06.2025
Accepted for publication 01.07.2025