Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Том 27

№ 1 2025

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с апреля 1999 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры строительной механики ТГАСУ, г. Томск; гл. редактор; *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*

Галяутдинов З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; *z.galyautdinov@tsuab.ru*

Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, профессор кафедры технологии строительного производства ТГАСУ, г. Томск; *tsp_tgasu@mail.ru*

Дегтярев 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 В.Н., 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*

Кудяков А.И., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; *kudyakov@tsuab.ru*

Кумпяк 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@tpu.ru*

Люсия Тсантилис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; *lucia.tsantilis@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 ОшГУ, г. Ош, 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@ya.ru*

Ситникова Е.В., канд. архитектуры, доцент кафедры реставрации и реконструкции архитектурного наследия ТГАСУ, г. Томск; *elensi@vtomske.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. Иркутск; *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.tsuab.ru

Научное издание

ВЕСТНИК ТГАСУ № 1 – 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, В.Н. Коршунова, Е.А. Кулешова. Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.
Технический редактор Н.В. Удлер.
Подписано в печать 21.02.2025. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс. Дата выхода: 28.02.2025.
Уч.-изд. л. 17,09. Усл. печ. л. 20,3. Тираж 200 экз. Заказ № 4. 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

№ 1 2025
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

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; *bekker.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_tgasu@mail.ru*
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow, Russia; *ilyichev@raasn.ru*
Kaprielov S.S., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Laboratory at Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia; *kaprielov@masterbeton-mb.ru*
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies, TSUAB, Tomsk, Russia; *kopanitsa@mail.ru*
Kudyakov A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; *kudyakov@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*
Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB; Tomsk, Russia; *vgg-tomsk@mail.ru*
Volokitin 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 № 1 – 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, V.N. Korshunova, E.A. Kuleshova. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 21.02.2025. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 21.02.2025.
Published sheets: 17,09. Conventional printed sheets: 20,3. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 4.

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

16+

© Tomsk State University
of Architecture and Building, 2025

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Малая Е.В. Возрождение исторических промышленных городов в результате реновации производственного фонда 9
Поляков Е.Н., Полякова О.П., Воевода Ю.Е. Организация внутреннего пространства Марсельской «жилой единицы» (Ле Корбюзье, 1945–1952 гг.) 25
Филимонова В.В. Формирование архитектурного облика улиц как часть процесса развития образа современного города на примере города Мурманска 44
Бызова В.С., Смолина О.О. Анализ и ранжирование микрорайонов города Новосибирска по комфортности проживания 55
Фомин М.А., Золотарева М.В. Преобразование объектов портовой инфраструктуры на примере Нью-Йорка 70
Гурьева Е.И., Шутка А.В., Величко Г.М. Градостроительная концепция формирования архитектурно-пространственного решения мемориальных комплексов 82
Полянцева Е.Р. Архитектурная защита зданий от атаки БПЛА 99
Семенов С.И. Соотношение открытых и закрытых пространств в коворкингах 110
Карелин Д.В., Тырышкина М.С. Эволюция инженерного благоустройства городских улиц Сибирского региона (XVII – начало XX в.) 118

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Подшивалов И.И., Ющубе С.В., Тарасов А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлического каркаса производственной площадки при динамическом воздействии 132

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Окунев А.Ю., Левин Е.В. Моделирование нестационарного теплообмена через ограждающие конструкции с легкими вентилируемыми фасадами и кровлями 142

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Князева А.А., Смолина О.О. Инженерно-экологические аспекты использования растений для очистки поверхностного стока от загрязняющих веществ 157

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Волокитин Г.Г., Черемных В.А., Адам А.М., Саркисов Ю.С. Повышение биостойкости строительных изделий из древесины сосны путем обработки потоком низкотемпературной плазмы 172

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Крюков К.М. Практический подход к интеграции технологии информационного моделирования и бережливого строительства 180

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

Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Многокритериальное прогнозирование эксплуатационной надежности несущих балок металлических мостов 194

Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А. Метод определения безотказности пролетного строения моста на основе структурно-функционального подхода 203

Чернышова Н.А., Алексеев А.А., Банников А.А. К вопросу расчета асфальтобетонной плиты на упруго-податливом полупространстве 217

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Malaya E.V. Revitalization of Historic Industrial Cities after Productive Assets Renovation 9
Polyakov E.N., Polyakova O.P., Voevoda Yu.E. Interior Organization in Unité D'habitation (Le Corbusier, 1945–1952) 25
Filimonova V.V. Architectural Image of Streets as Part of Modern Urban Development on the Example of Murmansk 44
Byzova V.S., Smolina O.O. Comfortable Living Analysis and Ranking of Residential Districts in Novosibirsk 55
Fomin M.A., Zolotareva M.V. Port Infrastructure Conversion in New York City as an Example 70
Gur'eva E.I., Shutka A.V., Velichko G.M. Urban Planning Concept of Architectural Space Formation for Memorials 82
Polyantseva E.R. Architectural Protection of Buildings Against UAV Attack 99
Semenov S.I. Ratio between Open and Enclosed Space in Co-Working Space 110
Karelin D.V., Tyryshkina M.S. Evolution of Engineering Improvement of Urban Streets in the Siberian Region in the 17th and Early 20th Centuries 118

BUILDING AND CONSTRUCTION

Podshivalov I.I., Yushchube S.V., Tarasov A.A. Finite Element Modeling of Stress-Strain State of Manufacturing Site Metal Structure Under Dynamic Load 132

HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING (HVAC), LIGHTING SYSTEMS AND GAS NETWORKS

Okunev A.Yu., Levin E.V. Modeling of Unsteady Heat Transfer through Building Envelopes with Light Ventilated Facades and Roofs 142

WATER SUPPLY, SEWERAGE,
BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Knyazeva A.A., Smolina O.O. Engineering and Ecological Aspects of Planting for Contaminated Surface Flow Treatment 157

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Volokitin G.G., Cheremnykh V.A., Adam A.M., Sarkisov Yu.S. Improvement of Biological Resistance of Pine Wood Building Products using Low-Temperature Plasma 172

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Kryukov K.M. Practical Approach to Integration of Building Information Modeling and Lean Construction 180

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

Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V. Multicriteria Prediction of Service Reliability of Load-Bearing Beams of Metal Bridges 194
Ogurtsov G.L., Ermoshin N.A. Reliability Determination of Bridge Span Based on Structural and Functional Approaches 203
Chernyshova N.A., Alekseev A.A., Bannikov A.A. Strength Analysis of Prefabricated Bituminous Slab on Elastic Half-Space 217

АРХИТЕКТУРА
И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 9–24.

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 (1): 9–24.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 725.4
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-9-24 EDN: BPULTF

ВОЗРОЖДЕНИЕ ИСТОРИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕНОВАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ФОНДА

Елена Владимировна Малая
Московский архитектурный институт (государственная академия), г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Вопросы возрождения старых промышленных предприятий XIX – начала XX в. имеют ключевое значение для сохранения и развития уникальной архитектурной среды исторических городов, поддержания отечественного производства и экономической независимости, сохранения культурного наследия, увеличения уровня занятости населения и улучшения его благосостояния. На основе анализа современного состояния архитектуры и конструктивных элементов старых фабрик и прилегающих территорий предлагаются проектные решения по реставрации и восстановлению корпусов старых ткацких фабрик и демонстрация их успешной интеграции в современную городскую среду.

Материалы и методы. Исследование базируется на изучении истории развития архитектуры ткацких предприятий и жилых зданий Орехово-Зуева, прослеживается становление и развитие архитектуры промышленных комплексов и формирование архитектурно-художественного облика городской среды, а также изменение ее во времени. Представлены проектные предложения по реконструкции промышленных предприятий и городской жилой застройки, направленные на сохранение уникальности и разнообразия художественного образа исторического города.

Научная новизна работы заключается в разработке проектов реновации ткацких предприятий и модернизации производственных процессов, направленных на сохранение архитектурного и культурного наследия русского города, реализацию программы импортозамещения и укрепления экономической независимости страны.

Результаты. Разработаны эскизные предложения по восстановлению зданий и сооружений архитектуры промышленных предприятий и ансамблей исторического города.

Выводы. Возрождение промышленных предприятий XIX–XX вв. – важная задача для архитектуры, градостроительства и экономики нашей страны. Проведенное исследование

© Малая Е.В., 2025

показало, что старые корпуса ткацких фабрик обладают значительным потенциалом для долгосрочного использования, при этом архитектура прилегающих зданий играет ключевую роль в сохранении уникальной среды исторического города, его художественного образа и исторической идентичности. Элементы городской территории требуют восстановления для преображения исторической среды с новыми зданиями, подчеркивающими гармонию архитектурных ансамблей. Формирование новых жилых и общественных пространств в исторической среде города должно гармонично объединять архитектуру исторических и современных зданий, сохраняя облик старого промышленного города.

Ключевые слова: историко-культурное наследие, преобразование городской среды, жилая среда исторического города, промышленная архитектура, памятники промышленной архитектуры, возрождение шелкоткацких предприятий в России

Для цитирования: Малая Е.В. Возрождение исторических промышленных городов в результате реновации производственного фонда // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 9–24. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-9-24. EDN: BPULTF

ORIGINAL ARTICLE

REVITALIZATION OF HISTORIC INDUSTRIAL CITIES AFTER PRODUCTIVE ASSETS RENOVATION

Elena V. Malaya
Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia

Abstract. A renewal of old industrial enterprises of the 19–20th centuries are of key importance for Russia at the beginning of the 21st century, when it is necessary to develop the economy, domestic production, unique architectural environment of historical cities, preserve the cultural heritage, increase employment and develop the economic independence of the country as a whole. These issues are being gradually resolved, and architecture and urban planning cannot stand on the sidelines. The article presents restoration of enterprises and surrounding areas, design projects for residential buildings for factory workers in Orekhovo-Zuyevo.

Purpose: The study of the history of the architecture of industrial and residential buildings in Orekhovo-Zuyevo.

Methodology: The analysis of urban environment architecture in the historical industrial city, architecture of industrial complexes and creation of a new urban environment.

Research findings: Restoration is proposed for weaving factories and changes in the residential environment of the city, implementing the principles of preserving its uniqueness, artistic image, and historical identity. Elements of the urban environment need to be restored and include new elements matching the environment.

Originality: In addition to the historical analysis, project proposals are created. During the creation of project proposals, prerequisites are created for the emergence of such projects for the renewal of old enterprises and creation of a comfortable urban environment.

Keywords: historical and cultural heritage, urban environment, residential environment, factory workers, historical architecture, industrial monuments, silk-weaving enterprises

For citation: Malaya E.V. Revitalization of Historic Industrial Cities after Productive Assets Renovation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 9–24. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-9-24. EDN: BPULTF

Вводная часть

Одним из ключевых факторов подъема экономики в нашей стране является восстановление и возрождение промышленных предприятий, завоевавших славу и всеобщее признание на международном уровне более ста пятидесяти лет назад. Многие промышленные предприятия, обеспечивающие экономическую безопасность и стабильность страны более сотни лет, встретили новый XXI век в заброшенном или полуразрушенном состоянии. Шелкоткацкие производственные предприятия не всегда подлежат восстановлению, в первую очередь потому, что ценное оборудование давно вывезено, конструкции частично разрушены, система жизнеобеспечения сооружений нарушена полностью. Но необходимость возрождения промышленных предприятий в нашей стране, где заводы и фабрики были градообразующими, очевидна и актуальна.

Многие индустриальные города давно стали историей, национальной и культурной гордостью страны, но их состояние сегодня не соответствует высоким требованиям к комфортной среде современного города. На протяжении длительного времени проблеме сохранения памятников промышленной архитектуры не уделялось должного внимания, и, как следствие, гектары заброшенных промышленных территорий выделяются на фоне уже сформировавшейся городской застройки. При этом большинство фабрик и заводов давно стали визитной карточкой, эмблемой города, средой исторического города, вызывающей интерес туристов и предпринимателей.

Многие промышленные объекты находятся в центральных частях исторических городов, фактически представляя собой «город в городе», что делает эти территории привлекательными для инвесторов. Краснокирпичная архитектура фабрик привлекает внимание туристов, исследователей и специалистов различных областей, в том числе девелоперов. Однако здесь возникает конфликт интересов. Если предприятие сносят, а на его месте возводят жилую застройку, люди получают новые квартиры, однако утрачивают возможность заниматься творческим интеллектуальным трудом, который замещается сферой обслуживания. Вполне естественно, что человек не готов сменить профессию и не стремится стать работником парикмахерской после многолетней работы в должности, например, художника по росписи фарфора на крупном государственном предприятии. Эти социальные проблемы пока остаются нерешенными, вынуждая людей самостоятельно искать выход, тратя значительное время и силы на переезды в поисках новой работы.

Известно, что продукция отечественных фабрик, такая как фарфор, стекло, шелк и другие изделия, ранее успешно конкурировала с импортными товарами, которые сегодня наводнили рынок менее качественными и красивыми аналогами.

Для девелоперов более выгодно строить и продавать жилые или общественные здания, для бизнеса – получать офисные площади, тогда как заводы и фабрики оказываются вне зоны инвестиционной привлекательности, хотя они занимают центральное и почетное место в структуре исторического города, являясь его сакральным центром. Вопросы обеспечения жильем населения выходят за рамки настоящего исследования, однако архитектура обладает высокой ценностью благодаря своей исторической привлекательности и потенциалу для возрождения.

Представленное исследование посвящено проблемам реконструкции архитектурных ансамблей промышленных предприятий в исторически сложившейся застройке старого города, а также концепции развития жилого фонда прилегающих территорий.

Обзор литературы

Более 60 лет назад начались процессы градостроительной реконструкции и реновации старых неиспользуемых промышленных территорий и замены функциональной направленности промышленных предприятий в разных странах мира. Сохранение промышленной архитектуры оказалось ключевым фактором поддержания здоровой среды старинных городов.

Этой проблемой занимались многие отечественные исследователи, такие как Е.В. Вержбицкая, Н.С. Гераскин, Н.Н. Гераскина, А.Л. Гельфонд, А.Б. Дьяков, П.Н. Казаков, Е.И. Кириченко, Т.П. Кудрявцева, Е.Б. Морозова, М.Р. Сцепуржинская, А.М. Тихомиров, Л.А. Шлычков, М.С. Штиглиц, Е.Г. Щеболев и Г.Н. Черкасова, которые рассматривали вопросы реконструкции промышленных зданий и сооружений.

Анализ научно-исследовательских работ в области реставрации и градостроительной реконструкции позволяет выделить направления реновации объектов индустриального наследия, которые отражены в документах международных организаций ЮНЕСКО, ИКОМОС. Известно, что на заседании ООН, на Международной конференции Хабитат III в Эквадоре, культурное наследие признано важным фактором устойчивого развития современных городов[1]. При этом подчеркивается ключевая роль культуры в сохранении и устойчивом развитии современных городов [5].

Материалы и методы

Исследование памятников промышленного наследия проведено с использованием комплекса методов, направленных на изучение объектов индустриального наследия, их истории, периодов проектирования и строительства, развития и периодов реконструкции. Особое внимание уделяется изучению архитектурных особенностей каждого отдельного объекта, его конструктивной основы и специфики, исследованию опыта реконструкции и процесса восстановления аналогичных сооружений. Материалом для представленного исследования стали известные и очень успешные проекты перепрофилирования и адаптации промышленных предприятий к жизни современного города.

Общая часть

Архитектурная реконструкция городской среды во многих российских и европейских городах довольно часто проводится за счет вывода промышленных предприятий за пределы города, освобождая территорию для новой функциональной насыщенности. Жителям городов приходится мириться с закрытием заводов, однако они не допускают разрушения старых здания и сооружений, стремясь со-

[1] Культура лежит в основе благоустройства и обновления городов. URL: https://www.unesco.org/ru/articles/kultura-lezhit-v-osnove-blagoustroystva-i-obnovleniya-gorodov

хранить исторический облик города для потомков и туристов. Тем не менее утрата любимой работы горожанами ведет к росту социальной напряженности и ухудшению здоровья. Эта проблема требует скорейшего решения путем возрождения многих промышленных предприятий. Так, в Берлине бывший пивоваренный завод в центральной части города был преобразован в общественный центр, а старые причалы и винодельческий завод в центральной части Москвы стали общественным торговым центром с возможностями для организации образовательных программ.

В нашей стране реконструкция старых предприятий путем изменения их функции не всегда оправданна, поскольку наряду с сохранением культурных традиций и уникальности архитектуры крайне важны обеспечение занятости населения и экономическая независимость страны. Фабрики и заводы во многих промышленных городах предоставляют жителям интересную и творческую работу, способствуют подъему экономики, формируют исторический облик города, служат своеобразным символом и представляют историческую ценность как памятники промышленной архитектуры. Кроме того, они производят товары народного потребления, оборудование и технику, необходимые для повседневной жизни.

Результаты исследования

В мире современной архитектуры много хороших примеров реставрации старых ткацких фабрик и успешной адаптации к жизни современного города [1]. Бывшая льнопрядильная фабрика Каслтон-Миллс в Линдсе (Великобритания), построенная в середине XIX в., спустя 150 лет после реставрации стала современным офисным центром с развитой инфраструктурой и свободной планировкой помещений. На рис. 1 представлена часть проектного предложения по изменению архитектурно-планировочного решения и созданию интерьеров с новой функциональной нагрузкой.

Рис. 1. Бывшая льнопрядильная фабрика Каслтон-Миллс в Линдсе. Фрагмент фасада, интерьерные решения офисов, план первого этажа здания фабрики[2]

Fig. 1. Former Castleton Mills flax spinning mill in Leeds. Fragment of the facade, interior offices, first floor

[2] URL: https://www.architecturalemporium.co.uk/project/castlemill/

Другим не менее интересным проектным решением является осуществленный проект реставрации одной из старейших фабрик Европы – хлопкопрядильной фабрики в Тисдорфе, расположенной в Нижней Австрии. Здания и сооружения этой фабрики были построены в 1803 г. с использованием передовых для своего времени технологий. Фабрика функционировала более ста лет до закрытия в нач. 1990-х гг. Постепенное разрушение фабричных построек потребовало поиска решений, позволяющих сохранить архитектурно-художественный облик объекта с одновременным изменением его функциональной нагрузки.

В ходе реставрации в здании был создан атриум для естественного освещения помещений, а также оставлены открытые террасы и балконы в квартирах. Проектом была предусмотрена установка системы центрального отопления, использование солнечных коллекторов на крыше для нагрева воды, а также применение высококачественных теплоизоляционных материалов. На кровле оборудован бассейн для жителей квартир (рис. 2).

Рис. 2. Проект восстановления здания старой фабрики в Тисдорфе с изменением функциональной нагрузки[3]

Fig. 2. Project of restoration of the old factory building in Teesdorf with changing functional load

В нашей стране существует немало успешных примеров осуществленных реставраций ткацких фабрик. Среди них можно упомянуть обновление зданий и прилегающей территории Даниловской мануфактуры, фабрики «Красная роза», Невской бумагопрядильной фабрики др. Все эти промышленные предприятия были преобразованы в культурно-развлекательные, офисные и торговые центры, став точками притяжения для жителей мегаполисов. Однако такой переход сопровождается обострением социальных проблем крупных городов. Несмотря на сохранение архитектурно-художественного облика старой промышленной застройки, многие жители остаются без работы, которая позволяла бы им развивать свои профессиональные навыки. Действующие фабрики обеспечивают возможность обучения, применения знаний на практике, создания товаров и развития экономики.

Проектные предложения по реконструкции архитектуры старых промышленных предприятий в нашей стране должны опираться на опыт собственной истории. Ткацкие фабрики, как и многие другие промышленные предприятия страны, неоднократно восстанавливались и возобновляли работу после Гражданской и Великой Отечественной войны, каждый раз за короткое время достигая успехов в развитии производства. Этот феномен еще недостаточно

[3] URL: https://www.wiensued.at/object/2524-teesdorf/

изучен историками, но для целей архитектурного проектирования накопленного опыта достаточно. Развитие промышленной архитектуры естественным образом приводит к преобразованию окружающей застройки и городской среды. В первую очередь необходимы научные исследования, подтверждающие возможность и необходимость реабилитации предприятий в каждом отдельном городе. До 1990-х гг. сотни действующих ткацких предприятий нашей страны радовали высоким качеством и разнообразием выпускаемой продукции, успешно конкурируя с импортными товарами.

Один из известных центров ткацкого производства Центральной России XIX в. – г. Орехово-Зуево [9]. Он известен градообразующими предприятиями Морозовых и Зиминых. Архитектурные ансамбли этих фабрик, расположенные на противоположных берегах р. Клязьмы, в 97 км от Москвы, более 150 лет назад сформировали панораму города, обеспечивая рабочими местами горожан и жителей прилегающих деревень [2].

За сотню лет до их создания, в селах Зуево и Орехово, было развито текстильное производство, многие жители занимались надомным ткачеством, создавая праздничные ленты и платки, одежду, ткани для семьи и на продажу. Уже в начале XVIII в. существовали артели, мелкие мануфактуры. Позднее развивались текстильные предприятия, возводились новые краснокирпичные производственные здания, магазины, формировались жилые районы, транспортные артерии, причалы и склады. В XIX в. в городе было множество мелких мануфактур и крупных шелкоткацких фабрик Ивана Медведева, Семена Григорьевича Зимина, Кононова, Саввы Васильевича Морозова [11]. В период Крымской войны многие шелкоткацкие предприятия перешли на изготовление более дешевых тканей из шерсти и хлопка.

Империя Морозовых, создавших фабрики по выпуску ситцевых и хлопчатобумажных тканей, занимала большую часть города с общежитиями, храмами, торговыми лавками, больницами и школами, формируя инфраструктуру города будущего. «В 1823 году зуевский крестьянин Савва Васильевич Морозов выкупил за 500 рублей у помещика Рюмина свободные земли на правом берегу Клязьмы на пустоши Плесы. Сюда в 1830 году Морозов перенес из Зуева товароотделочное и красильное заведение. Местечко получило название Никольское в честь погоста Николы в Орехове, а также в честь пуска здесь первой фабрики в день Николая Чудотворца… Границей Орехова с восточной стороны был нынешний перекресток улиц Ленина и Карла Либкнехта, где находится бывшая 79-я казарма Саввы Морозова (ныне Текстильный техникум). Далее начиналась вотчина Морозовых – местечко Никольское» [5].

На старых фотографиях запечатлены панорамы улиц, отражающие облик промышленного и купеческого города. В середине XIX в. в Никольском уже функционировали ткацкая и суконно-прядильная фабрики, оснащенные современными механическими станками, а в 1847 г. открылась и бумагопрядильная механизированная фабрика. Были построены 23 деревянные казармы, где проживало 3000 рабочих. Позже, в 1895 г., было построено 40 каменных двух- и трехэтажных казарм еще на 20 000 рабочих с их семьями[4]. Следует отметить, что на

[4] URL: https://vikidalka.ru/4-77421.html?ysclid=lmz2qhlp2m656071618

морозовских фабриках строго придерживались норм достойного общественного поведения, обязательного образования и медицинского обслуживания.

В конце XIX в. Морозовым удается ввезти в Россию ткацкие станки из Англии, опираясь на помощь английского предпринимателя Людвига Кнопа. Они устраивают новые корпуса фабрик, приглашая инженеров и лучших мастеров Европы [2]. Отечественные инженеры быстро освоили производство подобных станков, и уже в середине XX в. СССР продавал станки за границу.

Город рос, формируя жилые кварталы для работников фабрик в пешей доступности к рабочим цехам. Жилые здания создавались по материальной возможности владельцев: купцы строили свои двух- и трехэтажные дома, верхние этажи которых, как правило, были жилые, а в нижних располагались магазины, мастерские, увеселительные заведения, что также способствовало быстрому развитию города, а рабочие ютились в общежитиях или строили деревянные жилые дома (рис. 5). Семья фабрикантов Морозовых строила общежития для одиноких работников и комфортное жилье для инженерного состава.

Русские фабрики создавали качественные изделия, пользующиеся спросом в стране и далеко за ее пределами [4]. Известно, что фабрики Подмосковья составляли конкуренцию французским и итальянским предприятиям, но с 90-х гг. XX в. утратили свои позиции. Поэтому вопрос возрождения ткацких фабрик и развития процесса их восстановления в нашей стране приобретает особую значимость и становится предметом обсуждения научным сообществом.

На генеральном плане центральной части города видны планировки корпусов предприятий Морозовской фабрики (рис. 3, поз. *2* на генеральном плане) и на противоположном берегу р. Клязьмы Подгорной мануфактуры им И.Н. Зимина (рис. 3, поз. *1* на плане).

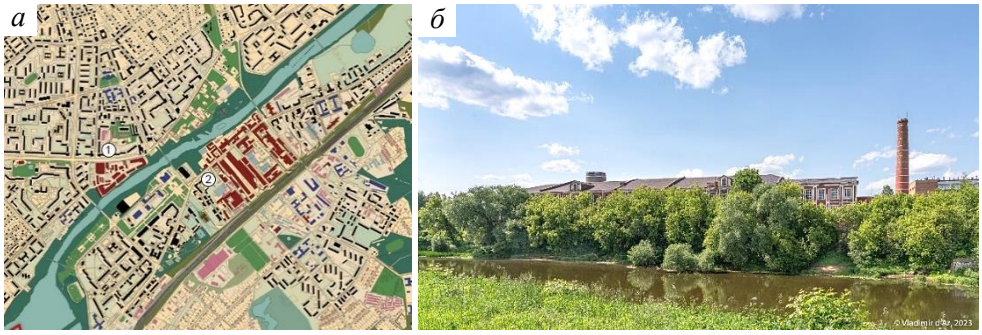


Рис. 3. Генеральный план центральной части исторического города Орехово-Зуево: *а* – территории фабрик на карте города обозначены красным цветом (часть дипломного проекта МАРХИ: *1* – фабрика Зиминых; *2* – Морозовых; *б* – корпус пунцово-прядильной фабрики Зимина. Фото снято с правого берега Клязьмы

Fig. 3 General plan of the central part of the historic city of Orekhovo-Zuyevo: *a* – factory territories on the city map are marked in red color: *1* – Zimin's factory; *2* – Morozov's factory; *b* – Zimin's crimson-spinning factory. View from the right bank of the Klyazma River

Сегодня панорама города подчеркивает давно сложившуюся значимость промышленных корпусов для сохранения идентичности города. Современный

подход к реновации территории исторического города предполагает разработку проектных предложений, включающих сохранение исторической среды старого города, проведение реставрации застройки, создание пешеходных пространств для развития туризма, а также озеленение территории быстрорастущими деревьями и кустарниками для оздоровления городской среды и улучшения комфорта жителей. Это позволит сохранить уникальность и своеобразие городской среды и отдельных архитектурных элементов [10, 12].

До начала XXI в. архитектурные ансамбли старых промышленных предприятий поражают красотой и стойкостью конструкций зданий. «Огромные фабричные корпуса по обеим сторонам улицы дружно держатся вместе как близкие родственники. Постороннему трудно определить, где кончается одна фабрика и начинается другая. А вокруг, проникая в закоулки и тупики прифабричных участков, тесно и беспорядочно толпятся домики, дома, казармы, склады, больница. Все это живет фабриками, возникло из фабрик, порождено ими» [3]. Так описывают градообразующие фабрики города его жители, и для них промышленные комплексы представляют собой неотъемлемую часть его истории и сакральное место (рис. 4). Поэтому реставрация и сохранение культурного наследия, создание озелененных пространств в исторической части города становится приоритетной задачей архитекторов и градостроителей.

Рис. 4. Фабричные корпуса[5]:
а – морозовские фабрики по ул. Ленина (бывшая ул. Никольская); *б* – мануфактурные постройки ткацкой фабрики Зимина. Фото с правого берега Клязьмы

Fig. 4. Factory buildings:
a – Morozov factories on Lenin Street (former Nikolskaya Street); *b* – Zimin's weaving factory. View from the right bank of the Klyazma River

Интересно отметить, что архитектура исторического города, какой она предстает перед нами в начале XXI в., сформирована под влиянием промышленных, жилых и общественных зданий. При этом архитектурно-художественный образ фабрик превалировал в застройке XIX в., когда город стал одним из ведущих промышленных центров России. Однако практически все предприятия были в данный период закрыты, и жители вынуждены преодолевать значи-

[5] URL: https://content-17.foto.my.mail.ru/bk/varavino/16159/h-16171.jpg

тельные расстояния в поисках работы. Организация производственных процессов в старых корпусах, вместо размещения в них торговых площадей, помогла решению этой серьезной социальной проблемы.

До наших дней сохранились некоторые здания, возведенные более ста пятидесяти лет назад, когда в Орехово и Зуево приглашали известных архитекторов, создавших художественный образ промышленного города с комфортными жилыми кварталами [6].

Известно, что многодетные семьи получали земельные участки для ведения сельского хозяйства и садоводства. Для инженерно-технических работников строились особняки или 3–5-этажные жилые дома с комфортными для того времени квартирами. На рис. 5, *а* представлены фото старых улиц города. Проект здания Бугровского дома (ныне ул. Ленина, 63) разработал московский архитектор М.Ф. Бугровский (отсюда и название. – *примеч. авт.*) для проживания инженеров фабрики с семьями [7]. На рис. 5, *б* представлен дом управляющего, являющийся современной интерпретацией русской избы. Сейчас настало время обратиться к лучшим примерам прошлого, использовать их в качестве образцов и разработать новые решения для работников фабрик. После окончания строительства жилых зданий можно будет привлечь молодых специалистов, предлагая им жилье и творческую работу [3].

Рис. 5. Дом инженеров и специалистов Морозовской мануфактуры, построен по проекту инженера М.Ф. Бугрова[6] (*а*); дом Оглоблина, управляющего фабрикой в 1894–1915 гг., подаренный ему Морозовыми[7] (*б*)

Fig. 5. House of engineers and specialists of the Morozovs Manufactory built by engineer M.F. Bugrov's project (*a*); house of Ogloblin, the factory manager in 1894–1915, given to him by the Morozovs (*b*)

Ниже представлены здания рабочих казарм (рис. 6, *а*), Никольского начального училища для будущих работников фабрики (рис. 6, *б*, *в*) и корпус городской фабричной больницы (рис. 6, *г*). Известно, что труд на фабрике был тяжелым и изнурительным, но забота о работниках существовала, а с 30-х гг. XX в. такая работа была почетной и престижной, работники пользовались многими благами и получали жилье бесплатно.

[6] URL: https://varandej.livejournal.com/721497.html?ysclid=ln66knjsq8897119746
[7] URL: https://kartarf.ru/images/heritage/1080/8/80659.jpg

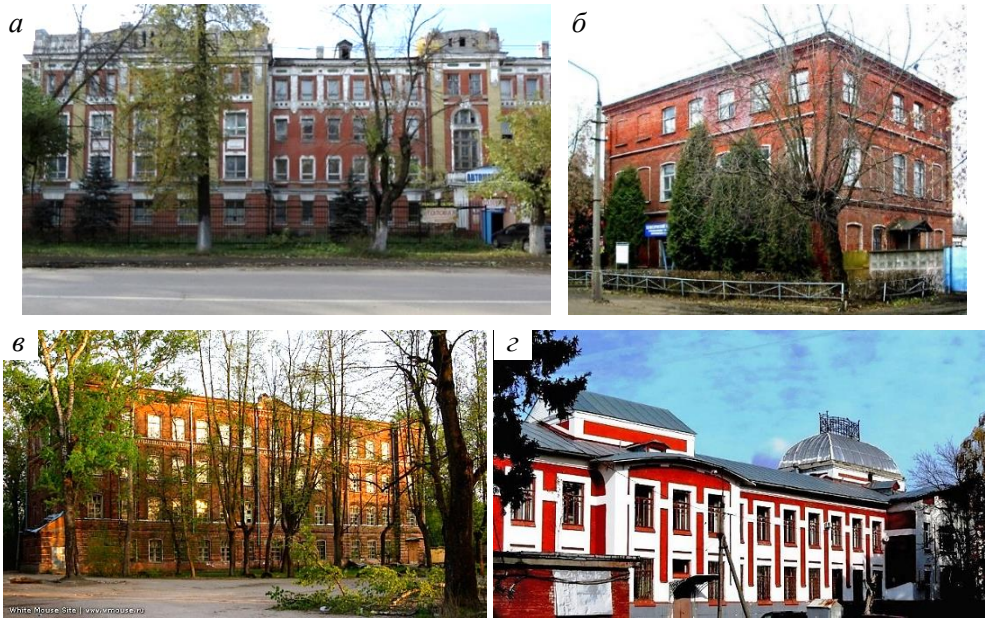


Рис. 6. Сохранившиеся постройки XIX в.:
а – казарма для проживания рабочих Морозовской мануфактуры; *б* – бывшее Никольское начальное училище С. Морозова, архитектор А.С. Каменский[8]; *в* – бывшее Никольское начальное училище С. Морозова, архитектор А.Н. Кнабе, сейчас это школа № 3[9]; *г* – корпус 1-й городской больницы со стеклянным куполом на крыше, архитектор А.А. Галецкий[10]

Fig. 6. Buildings of the 19th century:
a – barracks for workers of Morozovskaya manufactory; *b* – former Nikolskoe primary school of Morozov, architect A.S. Kamensky; *c* – former Nikolskoe primary school of Morozov, architect A.N. Knabe, now it is school No. 3; *d* – building of the 1st city hospital with a glass dome on the roof, architect A.A. Galetsky

Жилые и административные здания фабрик, построенные более полутора столетий назад, до сих пор сохраняют потенциал и могут еще много десятков лет служить городу, поэтому требуют реставрации с возможностью создания более комфортных условий проживания. Это возможность сохранить индивидуальность и колорит города.

Вопросы градостроительной реконструкции среды современного индустриального города, основным архитектурным ансамблем которого являлись фабрики, разнообразны и часто включают в первую очередь вопросы сохранения экологии и возвращения природы в города [8]. Проекты реконструкции и сохранения среды индустриального города являются важным условием работы архитектора. Удачным примером сохранения экологической устойчивости и интеграции природных элементов в урбанистическую ткань городов может служить набережная р. Роны в историческом центре французского города Леона, где снос исторических зданий запрещен законом (рис. 7, *а*). Леон больше 300 лет славился

[8] URL: https://dzen.ru/a/Y17K8_jzoRhfXNJF?ysclid=m5td93c4nv561599905
[9] URL: https://www.wmouse.ru/CityLHEvents/pics/architect-3shk2.jpg
[10] URL: https://arch-heritage.livejournal.com/1985238.html?ysclid=ltvpqf0drk749209777

производством шелка, хотя сегодня здесь функционируют лишь несколько небольших мануфактур и работает известный музей шелка, в экспозиции которого представлены ткани и российского производства, которым отведено достойное место. На рис. 7, *б* показана панорама набережной р. Клязьмы в Орехово-Зуеве после проведенной реконструкции. Этот город также был известен как центр шелкового и хлопчатобумажного производства. В результате реконструкции набережная превратилась в привлекательное общественное пространство, став центром притяжения жителей города. Однако существенным недостатком является отсутствие зеленых зон, которые создают комфортный микроклимат в летнее время, атмосферу уюта, способствуя улучшению общего состояния окружающей среды. Несмотря на удачную организацию пространства на примере отечественной практики, отсутствие зеленых насаждений снижает качество жизни горожан, поэтому необходима доработка проекта. Эта проблема решается молодыми архитекторами в рамках учебного процесса.

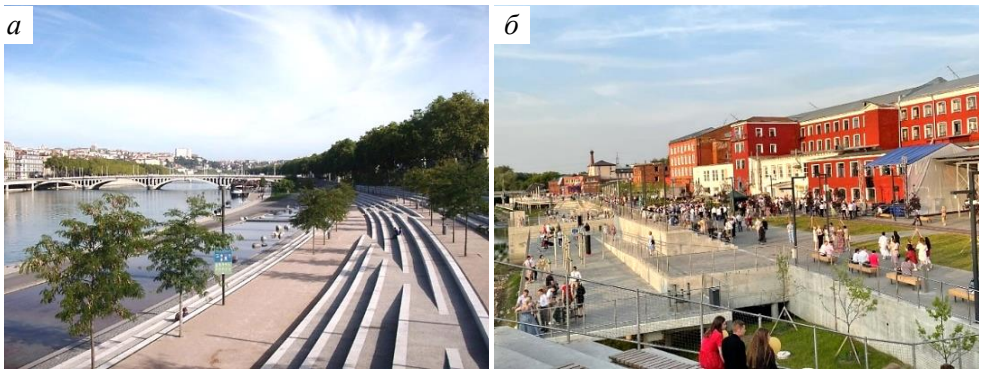


Рис. 7. Организация прибрежной территории индустриального города[11]:
а – новая набережная Роны в Лионе; *б* – благоустройство набережной в Орехово-Зуеве, 2007 г.

Fig. 7. Coastal territory of an industrial city:
a – new embankment of the Rhone in Lyon; *b* – embankment improvement in Orekhovo-Zuyevo, 2007

Студентами-архитекторами Российской академии живописи, ваяния и зодчества Ильи Глазунова были разработаны проектные предложения по строительству жилых и общественных зданий для исторических промышленных городов нашей страны.

В рамках представленного исследования были подготовлены проектные решения по восстановлению зданий и сооружений ткацких фабрик в ряде городов. Особый интерес вызывает фабрика Зиминых, которая предоставляет возможность реализации проектов по возрождению ее старых корпусов и прилегающей территории. Предложения по реконструкции и реставрации зданий старой фабрики Зиминых в Орехово-Зуеве разрабатываются студентами в рамках дипломного проектирования, к сожалению, они пока не поддерживается финансированием, поэтому корпуса ткацкой фабрики находятся в заброшенном состоянии (рис. 8).

[11] URL: https://prorus.ru/projects/naberezhnaya-reki-klyazma-v-orehovo-zuevo/?ysclid=ltvpssf2fa619504317

Рис. 8. Бумагопрядильная фабрика С. Морозова в Орехово-Зуеве[12] (*а*); современное состояние зданий и сооружений фабрики[13] (*б*)
Fig. 8. Morozov's Paper Spinning Mill in Orekhovo-Zuyevo (*a*), its modern buildings (*b*)

В рамках образовательного процесса в Российской академии живописи, ваяния и зодчества Ильи Глазунова были созданы проекты реставрации и восстановления зданий и сооружений ткацкой фабрики Зиминых (рис. 9). Реализация подобных проектных предложений поможет возродить уникальность архитектурных ансамблей этих городов, одновременно предоставляя местному населению возможность для творческой деятельности, обеспечивая его товарами народного потребления хорошего качества, способствуя подъему экономики региона.

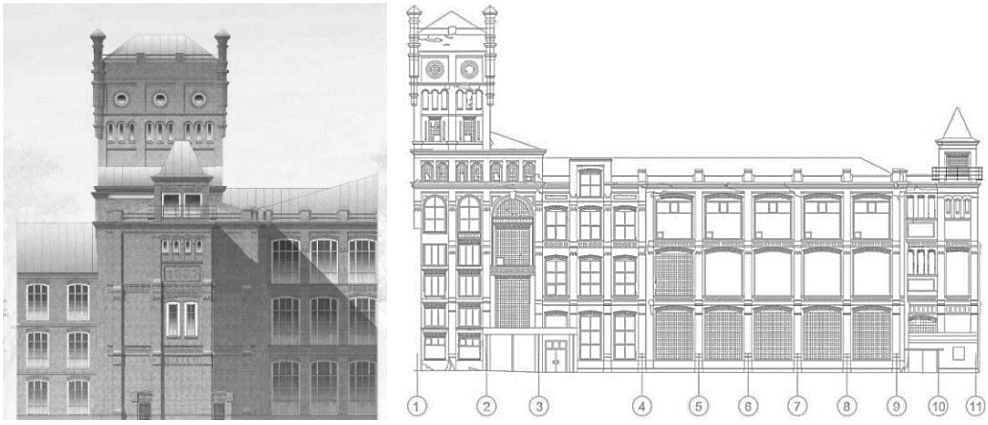


Рис. 9. Чертежи основного рабочего корпуса. Часть проекта восстановления корпусов Подгорной мануфактуры Зиминых в Орехово-Зуеве, студент Н. Зайнулина, руководитель А.И. Томилова[14]
Fig. 9. Drawings of the main building. Part of the restoration project of Podgornaya Zimins' manufactory in Orekhovo-Zuyevo by student N. Zainulina, supervisor A.I. Tomilova

[12] URL: https://историческийбагаж.рф/post/proizvodstvennyy-kompleks-byvshih-morozovskih-fabrik-697?ysclid=m5phwzt02j771704582
[13] URL: https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen_doc/5220747/pub_61a0fbc651b5ac0167bcef61_61a0fbc83f8fe974147ca865/scale_1200
[14] URL: https://archi.ru/russia/97388/diplomy-magistrov-i-bakalavrov-akademii-glazunova#slider-16

На рис. 10 представлены виды основного корпуса Подгорной мануфактуры Зиминых в Орехово-Зуеве после завершения реставрации, иллюстрирующие значимость проведения подобных работ для сохранения исторической среды и культурного наследия города для будущих поколений.

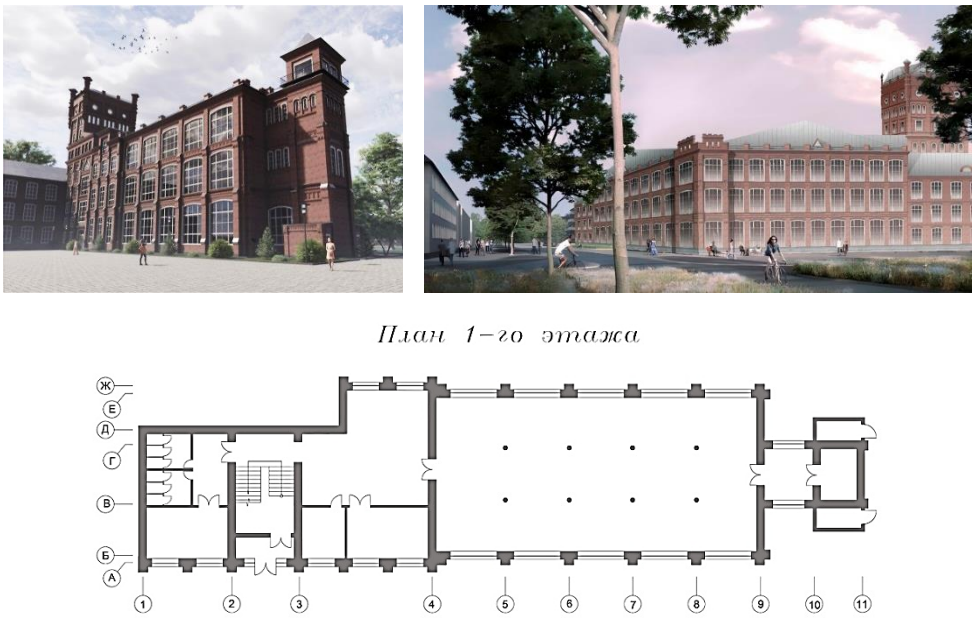


Рис. 10. Виды основного корпуса после проведения реставрации. План 1-го этажа одного из зданий фабрики после реконструкции. Часть проекта реставрации и восстановления Подгорной мануфактуры Зиминых в Орехово-Зуеве, студент Н. Зайнулина, руководитель А.И. Томилова[15]

Fig. 10. Views of the main building after restoration. Plan of the 1st floor of one of the factory buildings after reconstruction. Part of the project of restoration of the Zimin's Podgornaya Manufactory in Orekhovo-Zuyevo by student N. Zainulina, supervisor A.I. Tomilova

Аналогичные работы по восстановлению старых фабрик необходимы каждому промышленному центру, а обустройство зеленых пространств на прилегающих территориях обеспечит сохранение и поддержание благоприятного микроклимата [10, 12]. Это будет способствовать сохранению уникальной архитектуры исторического города, созданию рабочих мест в сфере творческих профессий и в конечном итоге укреплению экономической независимости страны.

Выводы

1. Возрождение старых промышленных предприятий XIX – начала XX в. и всей исторической среды города имеет ключевое значение для России. Здания и сооружения фабрик обладают значительным потенциалом для многолетнего использования. Поэтому проекты по реновации исторических производственных ансамблей необходимы для сохранения и развития культурной самобытности

[15] URL: https://archi.ru/russia/97388/diplomy-magistrov-i-bakalavrov-akademii-glazunova#slider-16

страны, обеспечения экономической независимости, поддержки отечественного производства, сохранения уникальной архитектуры исторических городов, для решения социальных вопросов и реализации стратегии импортозамещения.

2. Основными способами преобразования исторической среды являются: научные исследования, направленные на возрождение традиционных черт русского города, возвращение в города обновленных после реставрации промышленных объектов, реконструкция фабричных корпусов и благоустройство прилегающих территорий. Представленные проектные предложения по реставрации и восстановлению корпусов ткацких фабрик, а также примеры их интеграции в среду современного города, выполненные на основе анализа текущего состояния архитектурных объектов фабрики и окружающих зданий, нацелены на возрождение производственного потенциала нашей страны. Следует подчеркнуть необходимость подобного научно обоснованного подхода к разработке проектных решений по возрождению старых предприятий.

3. Проектные предложения должны учитывать принципы сохранения уникальности исторического русского города, его художественного облика и культурной идентичности. Новые здания должны быть интегрированы в историческую среду так, чтобы они гармонировали с архитектурной средой, подчеркивали целостность архитектурных ансамблей. Необходимо создавать современные жилые и общественные пространства, гармонично объединяющие архитектуру исторических и новых построек, сохраняя атмосферу старого промышленного города.

Список источников

1. *Кастянов В.Ф., Табаков Н.А.* Опыт зарубежных стран в области реконструкции городской застройки // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 21–26. EDN: PUMPUH
2. *Муховицкая Л.* Морозовы. Династия меценатов. Москва : Энтраст трейдинг, 2015. 253, [2] с. ISBN 978-5-386-07954-3.
3. *Алексеев В.Н., Лизунов В.С.* Моя малая родина. Руководство по краеведению. Орехово-Зуево, 1998. 455 с. ISBN 5-87471-036-1.
4. *Бирюкова А.А.* Никольское – вотчина Морозовых. Орехово-Зуево : ООО «ИЛТС», 2015. 133 с.
5. *Папенов К.В., Никоноров С.М., Ситкина К.С.* Устойчивое развитие городов. Москва : Экономический факультет МГУ, 2019. 288 с. ISBN 978-5-906783.
6. *Шевченко И.К., Развадовская Ю.В., Марченко А.А.* Текстильная промышленность в России: история и современность // Пространство экономики. 2019. № 1. С. 131–149. DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-1-131-149
7. *Стратегии старопромышленных городов*: международный опыт и перспективы в России / под ред. И. Стародубровской. – Москва : Изд-во Института Гайдара, 2011. 248 с. ISBN 9785932553084.
8. *Гофман В.Д.* Фабрично-заводская архитектура. Часть 3. Ленинград : КУБУЧ, 1929. 284 с.
9. *История российского производства*. Красноярск : Гермес, 2002. 122 с.
10. *Кругликова Г.А.* Сохранение культурного наследия как фактор социального здоровья нации. URL: http://do.teleclinica.ru/184727
11. *Кузьмичев А.Д., Петров Р.Р.* Русские миллионщики: Семейные хроники / Авт. некоммерч. организация «ИНЭС». 2-е изд., доп. Москва : ЭКОН, 1999. 187, [1] с.
12. *Малая Е.В.* Роль шелкоткацких предприятий в создании дворцовых интерьеров XIX века (на примере фабрик Сапожниковых) // Architecture and Modern Information Technologies. 2020. № 1 (50). С. 271–283. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15017. URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/1kvart20/PDF/17_malaya.pdf

Reference

1. *Kastyanov V.F., Tabakov N.A.* The Experience of Foreign Countries in Urban Development Reconstruction. *Vestnik MGSU*. 2011; (8): 21–26. EDN: PUMPUH (In Russian)
2. *Mukhovitskaya L.* The Morozovs. A Dynasty of Philanthropists. Moscow: Entrast trading, 2015. 253, [2] p. ISBN 978-5-386-07954-3. (In Russian)
3. *Alekseev V.N., Lizunov V.S.* My Small Homeland. Guide to Local Lore. Orekhovo-Zuyevo, 1998. 455 p. (In Russian)
4. *Biryukova A.A.* Nikolskoye – Patrimony of the Morozovs. Orekhovo-Zuyevo, 2015. (In Russian)
5. *Papenov K.V., Nikonorov S.M., Sitkina K.S.* Sustainable Urban Development. Moscow, 2019. P. 139. ISBN 978-5-906783. (In Russian)
6. *Shevchenko I.K., Razvadovskaya Yu.V., Marchenko A.A.* Textile industry in Russia: History and modernity. *Prostranstvo ekonomiki*. 2019; (1): 131–149. DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-1-131-149 (In Russian)
7. *Starodubrovskaya I. (Ed.)* Strategies of Old Industrial Cities: International Experience and Prospects in Russia. Moscow, 2011. 248 p. ISBN 9785932553084. (In Russian)
8. *Gofman V.D.* Factory Architecture. Part 3. Leningrad: KUBUCH, 1929. 284 p. (In Russian)
9. History of Russian Production. Krasnoyarsk: Germes, 2002. P. 54. (In Russian)
10. *Kruglikova G.A.* Preservation of cultural heritage as a factor of social health of the nation. Available: http://do.teleclinica.ru/184727. (In Russian)
11. *Kuzmichev A.D., Petrov R.R.* Russian Millionaires: Family Chronicles. 2nd ed., Moscow: EKON, 1999. 187, [1] p. (In Russian)
12. *Malaya E.V.* The Role of Silk-Weaving Enterprises in the Creation of Palace Interiors of the 19th Century (on the example of Sapozhnikov Factories). *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020; 1 (50): 271–283. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15017 (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, arxe_elena@mail.ru

Author Details

Elena V. Malaya, PhD, A/Professor, Moscow Architectural Institute (State Academy), 11, Rozhdestvenka Str., 107031, Moscow, Russia, arxe_elena@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.01.2024
Одобрена после рецензирования 24.01.2025
Принята к публикации 27.01.2025

Submitted for publication 23.01.2024
Approved after review 24.01.2025
Accepted for publication 27.01.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 25–43.

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 (1): 25–43.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 72.036
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-25-43 EDN: DFVKSJ

ОРГАНИЗАЦИЯ ВНУТРЕННЕГО ПРОСТРАНСТВА МАРСЕЛЬСКОЙ «ЖИЛОЙ ЕДИНИЦЫ» (ЛЕ КОРБЮЗЬЕ, 1945–1952 ГГ.)

Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова, Юлия Евгеньевна Воевода
Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. Статья посвящена одному из наиболее известных проектов многоэтажных жилых зданий, выполненных французским архитектором Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) в традициях функционализма и брутализма. Авторами проанализированы основные архитектурно-дизайнерские концепции Шарля-Эдуарда, заложенные в общую систему пропорционирования, планировочные схемы этажей, в решения фасадов и интерьеров жилых ячеек этого необычного для своего времени здания.

Ключевые слова: Франция, Марсель, район Пуасси, Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), Марсельская «жилая единица», конструктивные решения «жилой единицы», «ленточные» фасады, система пропорционирования «Модулор», «свободная» организация внутреннего пространства

Для цитирования: 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. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-25-43. EDN: DFVKSJ

ORIGINAL ARTICLE

INTERIOR ORGANIZATION IN UNITÉ D'HABITATION (LE CORBUSIER, 1945–1952)

Evgenii N. Polyakov, Ol'ga P. Polyakova, Yulia E. Voevoda
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The article is devoted to one of the most famous projects of multi-storey residential buildings made in the traditions of functionalism and brutalism by S.-E. Jeanneret-Gree (Le Corbusier), a French architect. The authors analyze the main architectural and design concepts of Charles-Edouard, embedded in the general proportioning system, floor plans, facades and interiors of residential cells of this unusual building.

© Поляков Е.Н., Полякова О.П., Воевода Ю.Е., 2025

Keywords: France, Marseille, Poissy district, S.-E. Jeanneret-Gry (Le Corbusier), Unité d'Habitation, design solution, “ribbon” facades, proportioning system Modulor, ‘free’ organization of interior space

For citation: 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. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-25-43. EDN: DFVKSJ

Настоящее исследование является логическим завершением нашей предыдущей статьи, опубликованной в декабре 2024 г. [1], которая была посвящена уникальному многоэтажному зданию, построенному в г. Марселе по окончании Второй мировой войны. Инновационная конструктивная система данного здания («стойка для бутылок») принципиально отличается от традиционных моделей многоэтажных жилых домов того периода. Все его квартиры встроены в прямоугольный сетчатый каркас, состоящий из железобетонных стоек и балок. Однако технология изготовления, использованная марсельскими строителями, оказалась не очень удачной. Бетон, заливаемый в грубо сделанную опалубку (Béton brut), невозможно было вовремя «отшлифовать», сделав его поверхность более гладкой и «пластичной». Вместо того, чтобы бороться с этим недостатком, Ле Корбюзье превратил его в свой художественный принцип: «Любое изменение средиземноморского освещения отражается с особенной интенсивностью на грубых поверхностях вентиляционных шахт и башни лифта, расположенных на крыше, что помогает превращению этих утилитарных конструкций во впечатляющие скульптурные элементы…» [2]. Архитектор считал, что бетон является искусственным камнем, который следует демонстрировать в его естественном состоянии. Все его текстурные дефекты по-своему живописны: «Ведь у мужчин и женщин вы не замечаете морщин и родимых пятен, кривых носов, бесчисленных странностей... Дефекты – это мы сами, наша повседневная жизнь…»[1]. Сам того не желая, он создал новое направление в современной архитектуре – брутализм. Немного позже в Англии появилось сходное архитектурное направление – новый брутализм (New Brutalism). Грубая бетонная поверхность стала одним из приемов пластического решения фасадов и интерьеров строившихся в этот период зданий и сооружений. Марсельская «жилая единица» стала одной из первых построек, выполненных в этом стилевом направлении (рис. 1).

Имеется относительно правдоподобная версия столь экстравагантного выбора французского зодчего. С самого начала своей творческой карьеры Шарль-Эдуард мечтал строить здания из стальных конструкций. Однако в тяжелый послевоенный период он был вынужден довольствоваться более дешевым железобетоном: «Некоторые критики порицали его за работу с этим "неэстетичным" материалом, а другие обратили внимание на то, как архитектор сумел использовать бетон для создания ярких текстур, реагирующих на изменения освещенности…»[2].

[1] Лучезарный город Ле Корбюзье: прорыв или утопия? (часть 1). URL: https://agritura.livejournal.com/275976.html?ysclid=lxylplq64d873879612

[2] Радикал и реформатор от архитектуры: Ле Корбюзье. Эпизод второй: Возможности и формы. URL: https://dzen.ru/a/Zj EguzHqzjp ZIkVi?ysclid=ly0rr 8jjm 9619093598

Рис. 1. Процесс монтажа Марсельской «жилой единицы»[3]; ее лестничная клетка[4]
Fig. 1. Installation process of Unité d'Habitation

Об архитектурных особенностях этого уникального здания уже написано немало книг и научных статей. Приведем несколько наиболее ярких цитат, посвященных решению его фасадов и интерьеров:

«Ничего подобного мир еще не видел. Огромный бетонный колосс на мощных ногах-опорах выглядел словно доисторическое чудовище, волей писателя-

[3] URL: https://agritura.livejournal.com/275976.html?ysclid=lxylplq64d873879612; https://varlamov.ru/2751912.html?ysclid=lxzufd6 6id828021379
[4] URL: http://corbusier. totalarch.com/unite_d_habitati- on_marseille

фантаста заброшенное на окраину ничего не подозревавшего города. Создатель сравнивал его с океанским лайнером, а на деле это была математически выверенная машина для жизни, 17-этажный механизм… Это эпохальное здание стало не только иконой нового архитектурного стиля, но и… на десятилетия вперед определило все развитие послевоенного градостроительства…» [3] (рис. 2).

Рис. 2. Восточный фасад Марсельской «жилой единицы». Видовая точка[5]
Fig. 2. Eastern Facade of Unité d'Habitation

Марсельская «жилая единица» (или «Лучезарный город») давно уже признана одним из самых значительных проектов Ле Корбюзье, выполненных в духе брутализма – послевоенной волны европейского модернизма: «Фасады из серого необработанного бетона (béton brut) и отсутствие какого бы то ни было декора (если не считать дозированного использования цвета на фасадах и необычных бетонных объемов на крыше, которые при ближайшем рассмотрении оказываются замаскированными вентиляционными шахтами) стали фирменной чертой европейской архитектуры на десятилетия вперед… Все это отличало марсельский проект от того, что строилось в те годы в Европе… "Вертикальный сад", как любовно называл марсельский блок Ле Корбюзье, настолько выбивался из архитектурного ландшафта 1940-х гг., что вызывал у современников весьма неоднозначные чувства. С одной стороны, консервативные марсельцы окрестили его La Maison du Fada ("Сумасшедший дом"). А с другой – о нем писали во всех французских газетах, на стройку что ни день приезжали съемочные группы, а Ле Корбюзье купался в лучах славы, наслаждаясь статусом первого "стархитектора" Европы…» [4].

[5] URL: https://cih.ru/wp/bld/files/2023/08/03.jpg

«Всю инновационность постройки дополняет стиль и внешний вид здания – необработанный бетон контрастирует с лоджиями, которые окрашены в самые разные цвета…»[6]. «Продуман не только дизайн фасада, но и его функциональность: каждая квартира имеет защитные козырьки от солнца на лоджии и сквозную вентиляцию от лоджии с одной стороны до небольшого балкона – с другой…» [5] (рис. 3).

Рис. 3. Лоджии Марсельской «жилой единицы»[7]
Fig. 3. Loggia in Unité d'Habitation

В научных источниках упоминаются лишь два варианта цветовой окраски фасадов «жилой единицы», сочетающие по три – пять цветов в стилевых традициях Питера (Пита) Корнелиса Мондриана (1872–1944). Зигфрид Гидион отметил интересный аспект в его окраске: «В этом здании были использованы интенсивные чистые краски. Но Ле Корбюзье как художник воздержался от окраски фасада, покрасив только боковые стенки балконов в красный, зеленый и желтый цвета…» [2] (рис. 4, 5).

При проектировании фасадов и внутреннего каркаса этого здания Ле Корбюзье использовал свою собственную систему пропорционирования – «Модулор»: «Ему не нравилось измерять пропорции помещений в привычных величинах – метрах или футах, он не видел в этом связи с жителем, для которого эти помещения строятся. Поэтому он взял за основу своей системы человека, стоящего в полный рост с поднятой рукой, и вычислял все пропорции в помещении по размеру частей тела этого человека: ноги, локтя, пальца. При вычислениях Ле Корбюзье основывался на удвоении, числах Леонардо Пизанского (Фибоначчи) и золотом сечении…» [5].

[6] Дом – это машина для жилья. URL: https://varlamov.ru/2751912.html?ysclid=lxzufd66id828021379
[7] URL: https://realt.onliner.by/2017/04/07/corbusier

Рис. 4. Цветовая окраска западного фасада Марсельской «жилой единицы»[8]
Fig. 4. Coloration of Unité d'Habitation

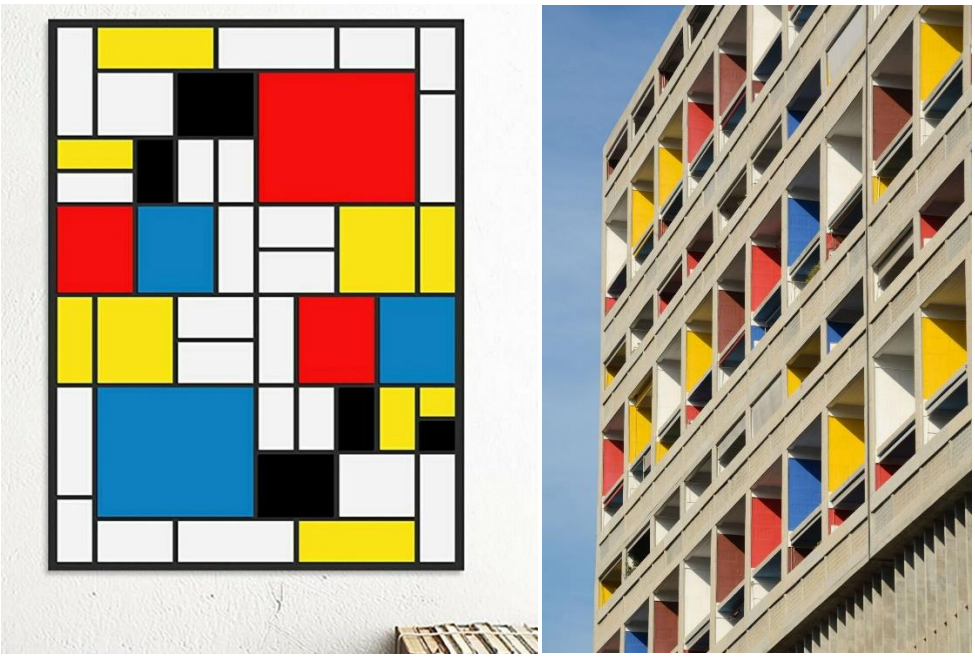


Рис. 5. Картина П.К. Мондриана «Композиция в красном, синем и желтом цветах» (1930 г.) (*слева*)[9]; фрагмент западного фасада Марсельской «жилой единицы» (*справа*)[10]
Fig. 5. "Composition in Red, Blue and Yellow Colors" by P.K. Mondrian (1930) (*left*); fragment of the western façade of Unité d'Habitation (*right*)

[8] URL: https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen_doc/3894718/pub_62e8f429d4848f04a1b6a467_63400610d0a8a77d809f23e0/scale_1200
[9] URL: https://learnodo-newtonic.com/piet-mondrian-famous-paintings
[10] URL: https://i.pinimg.com/ originals/a3/ae/7a/a3ae7ab882251a4d643c3968ac 334a54.jpg

Марсельский жилой комплекс стал настоящим испытательным полигоном для его создателя. Шаг колонн, габариты помещений и встроенной мебели, даже скульптурные объемы вентиляционных шахт на крыше были рассчитаны по «Модулору». Символом этой системы стал человек с поднятой вверх левой рукой. Не исключено, что это силуэт самого Шарля-Эдуарда, обладавшего высоким ростом ~183 см (рис. 6).

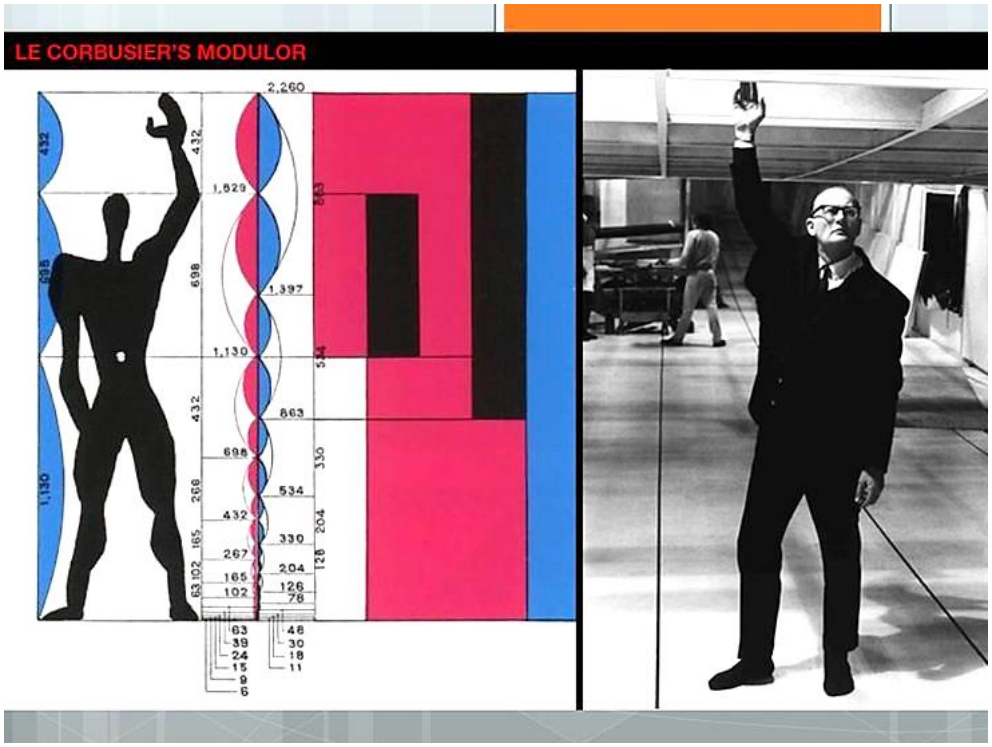


Рис. 6. «Модулор» Ле Корбюзье: общая схема и его «эталонная» фотография с поднятой рукой (1947 г.)[11]

Fig. 6. Le Corbusier's “Modulor”: general scheme and his “reference” photograph with raised arm (1947)

Этот феномен отметили авторы многих публикаций, посвященных Марсельской «жилой единице»: «Модулор»… выражен в эмблеме с изображением гипермускулистой фигуры человека с поднятой рукой; рядом две переплетающиеся спирали "красного" и "синего" ряда размеров, возрастающих в пропорции золотого сечения…» [6] (рис. 7).

«За основу "красного" ряда взят условный рост человека – 6 футов. Сам Ле Корбюзье отмечает, что он взял рослого мужчину по английским детективным романам. Интересно, что эта величина точно совпадает с эталоном Витрувия, у которого размер ступни или фут (0,3048 м) составляет 1/6 человеческого роста…» [6] (рис. 8).

[11] URL: https://i0.wp.com/www.purodesign.it/wp-content/uploads/2017/12/lecorbusiermodulor.jpg?w=736

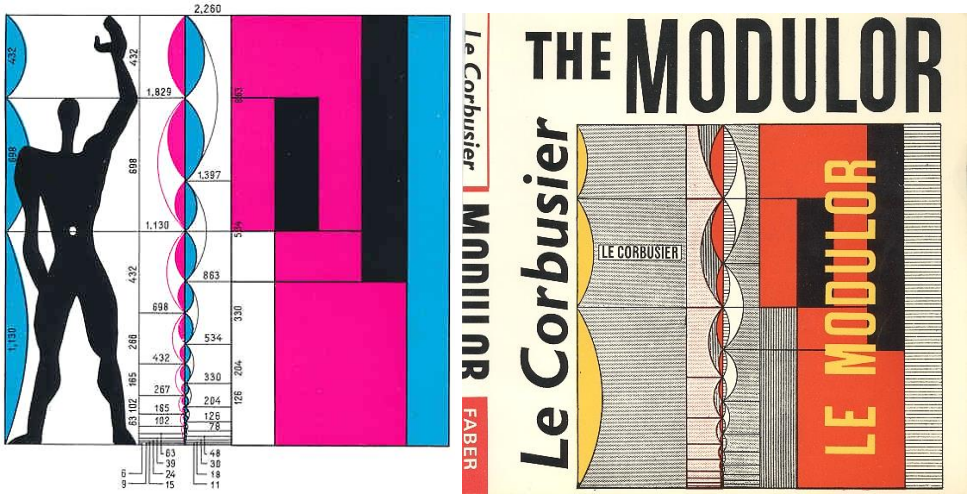


Рис. 7. «Модулор» Ле Корбюзье – общая схема, обложка его книги по этой тематике (1947 г.)[12]
Fig. 7. Le Corbusier's “Modulor”: general scheme, cover of his book (1947)

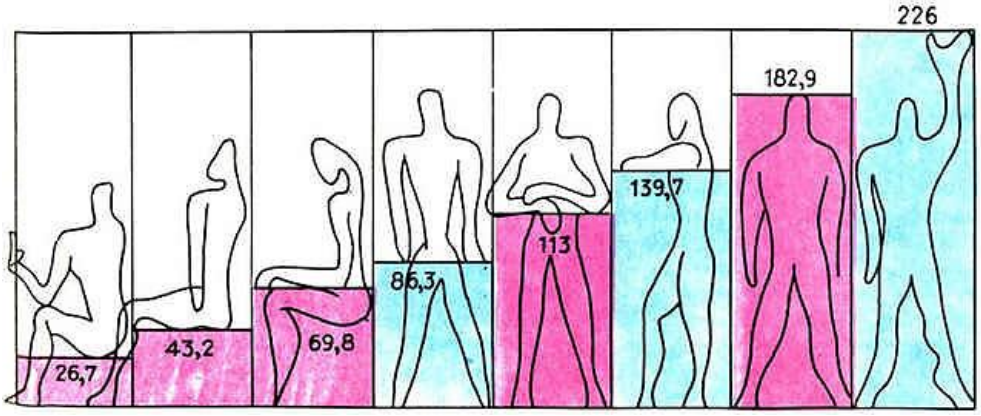


Рис. 8. Схемы пропорций по «Модулору» Ле Корбюзье[13]
Fig. 8. Proportions according to Le Corbusier's “Modulor”

Следует отметить, что еще в начале своей творческой карьеры Ле Корбюзье повидал и обмерил достаточно много античных и средневековых построек. В своей мастерской он пытался определить оптимальные размеры помещений и мебели, наиболее удобные и необходимые современному человеку. В результате он создал метрическую систему «Модулор», руководствуясь собственной интуицией и опытом. При этом он не опирался на какие-либо античные каноны и правила золотого сечения, сформировавшиеся в эпоху Возрождения и Нового времени (рис. 9).

[12] URL: https://dzen.ru/a/XRTlBg5mAQCwtYAu?ysclid= lyw72ficxm83 0101183; https://i.pinimg.com/originals/0e/12/e8/0e12e883093aa3718d4b35ae2c fec64e.jpg
[13] URL: https://dzen.ru/a/XR TlBg5mAQCwtYAu?ysclid=lyw77s70sz226787542

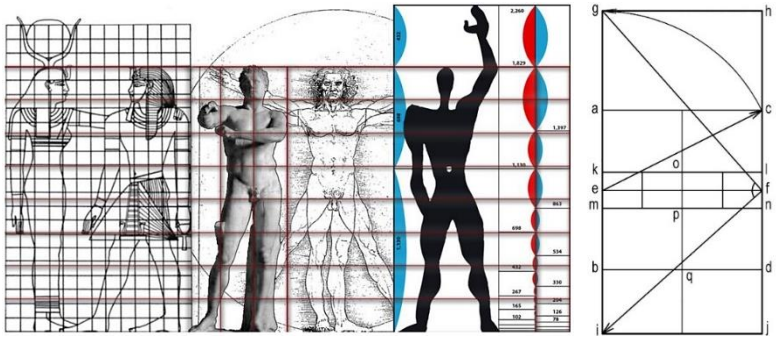


Рис. 9. Предшественники «Модулора» (зодчий Сенмут, скульптура Лисиппа «Апоксиомен», Леонардо да Винчи) (*слева*)[14]; построение «золотого» прямоугольника по методу Ле Корбюзье (В.Г. Власов, 2007 г.) (*справа*)[15]

Fig. 9. Predecessors of the Modulor (*left*); construction of “golden” rectangle by Le Corbusier's method by V.G. Vlasov, 2007 (*right*)

«Ле Корбюзье сравнивал свой "Модулор" с музыкальным инструментом – каждый может пользоваться им в меру своего таланта, но сам он таланта не прибавляет…»[16]. Поэтому одна из бетонных стен западного фасада Марсельской «жилой единицы» украшена рельефом, изображающим человека с поднятой левой рукой рядом со шкалой размеров «Модулора» (рис. 10). «Эта эмблема с полным правом занимает свое место у подножия дома, который с начала до конца спроектирован в пропорциях на основе "Модулора"…»[17] (рис. 11).

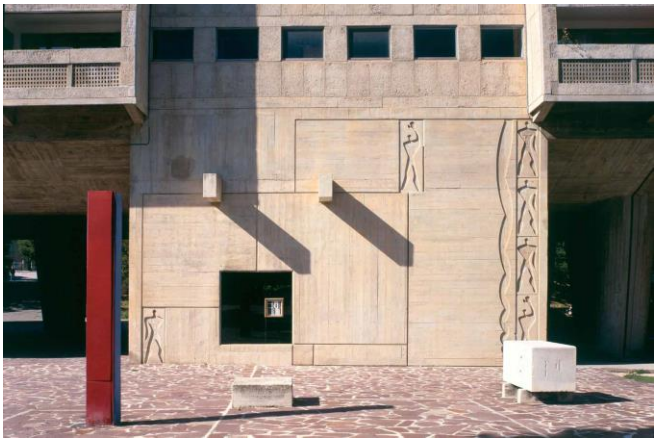


Рис. 10. Эмблема «Модулора» у подножия Марсельской «жилой единицы»[18]

Fig. 10. The Modulor emblem at the foot of Unité d'Habitation

[14] URL: https://www.mdpi.com/heritage/ herita-ge-03-00017/article_deploy/html/images/heritage-03-00017-g001.png

[15] URL: https://ru.wikipedia. org/wiki/Модулор#/media/Файл:Построение_золотого прямоугольника.tif

[16] Страсти по Модулору Ле Корбюзье. URL: https://dzen.yandex.ru/media/arhi1/strasti-po-modulorule-korbiuze-5d14e5060e660100b0b5802e

[17] Там же.

[18] URL: https:// www.lescouleurs.ch/fileadmin/media/journal/Bibliothek/Modulor/Slider8-Modulor-United_Habitation-Marseille-_c_-FLC-ADAGP---Paul-Kozlowski.jpg

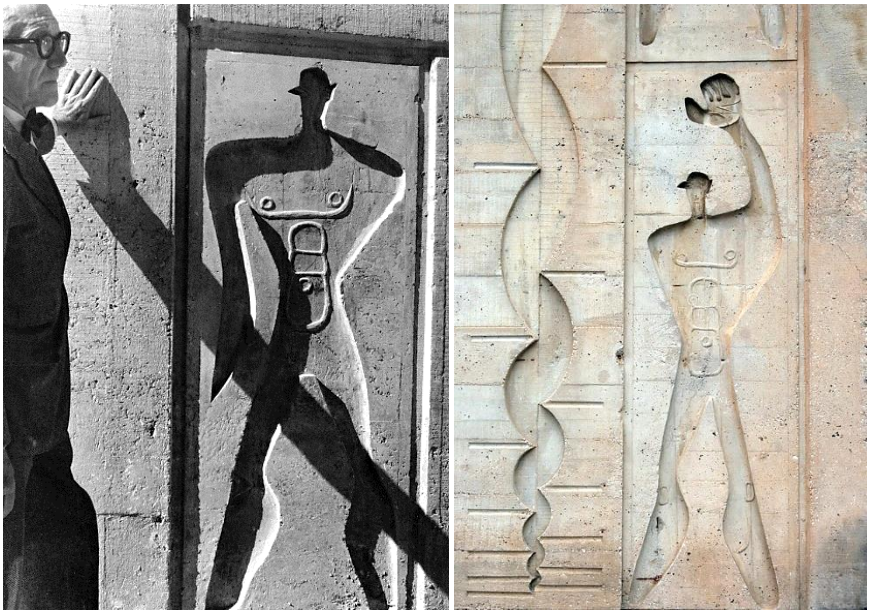


Рис. 11. Рельефные эмблемы «Модулора» у подножия Марсельской «жилой единицы»[19]
Fig. 11. Diaglyphic emblems of Modulor at the foot of Unité d'Habitation

Оценим цветовое решение и геометрические особенности интерьеров жилых ячеек и «общественных пространств» Марсельской «жилой единицы» (рис. 12).

Рис. 12. Модель квартиры в Марсельской «жилой единице»[20]
Fig. 12. A flat in Unité d'Habitation

[19] URL: https://i.pinimg.com/736x/a2/40/0f/a2400f6de5148573903c43d828426f46--marseille-white-photography.jpg; https://thumbs.dreamstime.com/b/более-corbusier-человек-2053094.jpg
[20] Радикал и реформатор от архитектуры: Ле Корбюзье. Эпизод второй: Возможности и формы. URL: https://dzen.ru/a/Zj EguzHqzjp ZIkVi?ysclid=ly0rr 8jjm 9619093598

«В 1952 г. после пятилетнего строительства 17-этажное здание на марсельском бульваре Мишле было сдано в эксплуатацию. Это действительно было нечто невиданное ранее. Бетонный каркас, установленный на массивные ноги-опоры, был, как стеллаж бутылками, заполнен модулями двухэтажных квартир-дуплексов. В плане они напоминают букву "Г" и состоят из двухсветной (на оба этажа) гостиной, выходящей на лоджию с солнцезащитным козырьком, и низкой части со спальнями, проходящей через все здание до маленького балкона на противоположном фасаде дома… Каждая такая квартира имеет свою пару, с которой они образуют единое целое, складываясь друг с другом подобно головоломке. Двойная высота гостиной первого дуплекса оказывается над низкой частью второго, а двойная высота гостиной второго – под низкой частью первого. Две парные двухэтажные жилые ячейки в форме буквы "Г", объединяясь, образуют один трехэтажный модуль, в центре которого, на среднем уровне, расположен внутренний коридор – своеобразная широкая улица, пронизывающая вдоль все здание. Благодаря такой схеме в "жилой единице" семнадцать этажей, но коридоров-улиц, на которые выходят квартиры и где останавливаются лифты (каждый на 20 человек), всего пять…»[21].

«Оценим некоторые типы квартир в Марсельском доме… Те, которые подлиннее, – сквозные, окна выходят на обе стороны дома – на холмы и на море. 337 квартир 23 различных типов, классифицированных от А до Н. Они предназначены для размещения семей от 1 до 10 человек. Ячейка А площадью 15,5 м² является базовым модулем. Тип В состоит из 2 смежных ячеек А и т. д. до типа Н площадью 203 м²…»[22] (рис. 13).

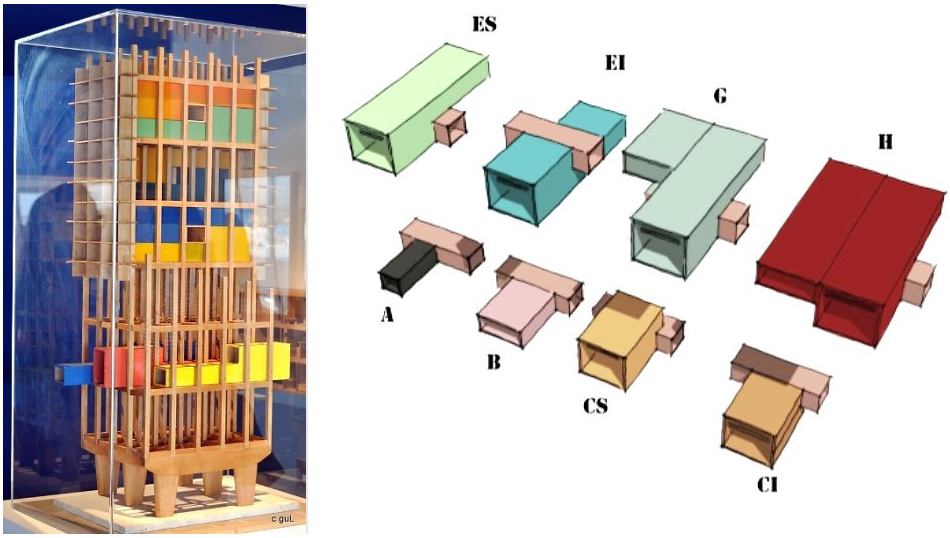


Рис. 13. Образцы типовых ячеек Марсельской «жилой единицы»[23]
Fig. 13. Typical cells in Unité d'Habitation

[21] Лучезарный город Ле Корбюзье: прорыв или утопия? (часть 1). URL: https://agritura.livejournal.com/275976.html?ysclid=lxylplq64d873879612
[22] Там же.
[23] URL: https: //agritura.livejournal.com/ 275976.html?ys- clid=lysej9grl368551488

«Между коридорами расположено два квартирных этажа по 2,28 м в чистоте. Если мы входим в квартиру, развивающуюся наверх, то перед нами передняя, кухня и гостиная 3,36 м шириной, частично двухсветная. На втором этаже спальня, нависающая над пространством гостиной, и две узкие спальни (детские) по 1,66 м шириной. При входе в такую спальню у стены расположен умывальник, шкаф и кровать. Дальше, ближе к окну, находится рабочий стол и раздвижная стена. С её помощью можно объединить часть пространства двух комнат. За спальнями и за гостиной находятся глубокие лоджии (в Марселе очень солнечно), что позволяет иметь ширину этого дома более 20 метров… Главная спальня открыта в гостиную. Малые спальни низкие, узкие и слишком длинные…» [2].

Для разработки интерьеров «жилой единицы» Ле Корбюзье привлекал многих талантливых специалистов в области архитектуры и дизайна. В частности, с ним тесно сотрудничали Жан Пруве и Шарлотта Перриан.

Жан Пруве участвовал в планировке жилых комнат, именно он придумал лестницу-трап, ведущую на второй уровень (рис. 14).

Рис. 14. Интерьер кухни-столовой, оборудованной лестницей-трапом. Фотография 1960 г.[24]
Fig. 14. Kitchen-dining room interior, 1960

Шарлотта Перриан занималась разработкой мебели. Жилище в пропорциях «Модулора» требовало принципиально иного подхода к интерьеру. Громоздкая мебель, рассчитанная на буржуазные довоенные дома, смотрелась бы в квартирах нового типа по меньшей мере чужеродно, поэтому в 1950 г. Ле

[24] URL: https://dzen.ru/a/ ZjEguzHqzjp ZIkVi?ysclid=ly0rr8jjm 9619093598

Корбюзье предложил ей разработать для строящегося в Марселе «Лучезарного города» типовой кухонный гарнитур: «Не выходя за рамки технического задания мэтра, Шарлотта смогла предложить по-настоящему революционную концепцию. Дело в том, что открытая кухня, совмещенная с гостиной, была для Франции тех лет совершенно новым явлением. В патриархальном французском доме кухню традиционно устраивали в северном торце коридора – в этом темном забытом богом углу мать семейства проводила большую часть дня, невидимая, как домашняя раба. Поэтому открытая кухня была настоящим феминистским заявлением. Теперь, готовя еду, женщина оставалась на виду и могла общаться с семьей и гостями через барную стойку, в которой было предусмотрено окошечко для подачи блюд к столу. Модульные шкафчики стандартной ширины и высоты (86 см), отделанные цветным пластиком или натуральным деревом, стальные мойки, мусоропровод, компактный встроенный холодильник и облицованные плиткой рабочие поверхности – все эти детали учитывали потребности современной женщины, для которой кухня и домашнее хозяйство были не единственным жизненным призванием…» [2] (рис. 15, 16).

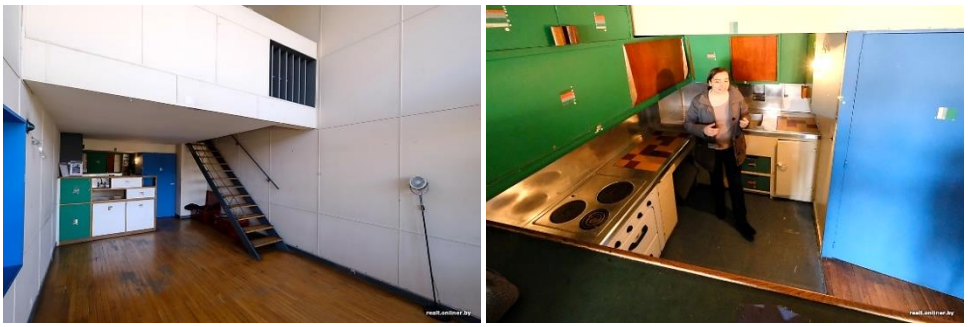


Рис. 15. Кухонная ниша под большой спальней. Видовые точки [3]
Fig. 15. Kitchen cell at the lower level of living unit

Рис. 16. Интерьер кухонной ячейки на нижнем уровне жилого блока[25]
Fig. 16. Living room interior in Unité d'Habitation

[25] URL: http: //corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_marseille

Это 17-этажное здание, рассчитанное на 1800 жителей, стало образцом для будущих жилых объектов массовой застройки. Его квартиры представляли собой различные комбинации трех стандартных блоков: первого – холла, кухни и гостиной (рис. 17); второго – комнат родителей и ванны; третьего – сдвоенных детских комнат (рис. 18), душевой и кладовой комнаты для хранения белья. В дальнейшем некоторые рослые обитатели Марсельской «жилой единицы» жаловались на то, что мебель, изготовленная Ш. Перриан, мала и не всегда удобна в эксплуатации.

Рис. 17. Гостиная под большой спальней (*слева*), большая спальня (*справа*) [3]
Fig. 17. Living room below the large bedroom (*left*), large bedroom (*right*)

Рис. 18. Интерьер жилой комнаты в Марсельской «жилой единице»[26]
Fig. 18. The interior of the living room in Unité d'Habitation

[26] URL: https://dzen.ru/a/ZjEguzHqzjp ZIkVi?ysclid=ly0rr8jjm9619093598

Марсельская «жилая единица» была завершена к 1952 г. Муниципалитет Марселя проявил осторожность – квартиры здесь не сдавались в аренду, а продавались, сразу же переходя в частную собственность: «За год после сдачи дома были проданы абсолютно все квартиры, а марсельский блок превратился в статусный адрес, любимый творческой интеллигенцией и продвинутыми марсельцами среднего класса…» [4].

Следует признать, что творение Корбюзье не принесло ожидаемого им результата. Выясним причины, почему это произошло.

Первая причина заключается в том, что проект получился неожиданно скандальным. За годы строительства выдающийся архитектор пережил множество нападок и судебных разбирательств. Упомянем лишь некоторые из них.

«У проекта была масса противников еще на этапе его предварительного обсуждения, а уж после окончания строительства в прессе началась настоящая травля. Архитектора обзывали инквизитором и сравнивали его идею социального жилья с концентрационными лагерями. Изначально в разрушенном войной Марселе планировалось возвести четыре таких дома, но с трудом закончили строительство первого, ставшего единственным. Несмотря на острый дефицит жилья в городе, противоречивый проект не прижился…»[27]. Затем – пять лет неистовых бурь, надругательств и жестоких предательств, нападки разъяренной и подстрекаемой прессы: «В 1950 г. президент медицинского общества департамента Сены заявил журналистам, что "жилая единица" удесятерит число душевнобольных во Франции из-за скученности и шума. Год спустя, когда подтвердились тишина и полная изолированность квартир, он же заговорил о том, что "в этих домах люди испытывают трагическое одиночество"…» [5].

«Министр строительства Клодиус Пети проявил смелость, встав на защиту Ле Корбюзье. Когда "жилая единица" на бульваре Мишле в Марселе была построена, против ее автора было заведено судебное дело с предъявлением иска в 20 миллионов франков "за нанесение ущерба природе Франции". В роли истца выступил 80-летний президент "Общества по охране ландшафта Франции". Однако он проиграл этот процесс…» [2].

Позднее стала понятной основная проблема подобных проектов. Слишком большое количество людей, проживающих в одном доме, не позволяет сформировать хорошее сообщество. Люди перестают общаться, узнавать соседей, запираются в своих «бетонных коробках». Сервисы, которые должны были удовлетворять потребности жильцов, начинают деградировать. Кому захочется каждый день есть в ресторане при доме? С экономической точки зрения они вообще оказались неконкурентоспособными. Даже в наши дни очень много жалоб поступает на качество строительных работ.

Однако Ле Корбюзье не сложил оружия. Позднее он построил еще четыре аналогичные «жилые единицы»: «Дом в Марселе стал первым в серии из пяти многоквартирных жилых комплексов для среднего класса, реализованной в разных городах Европы. Он послужил образцовой моделью для "жилых единиц" в Нант-Резе (Франция, 1952–1956 гг.), Берлине (1957 г.), Брие-ан-Форе (Франция, 1956–1957 гг.) и Фирмини (Франция, 1960 г.)…» [4] (рис. 19).

[27] Лучезарный город Ле Корбюзье: прорыв или утопия? (часть 1). URL: https:// agritura.livejournal.com/275976.html?ysclid=lxylplq64d873879612

Рис. 19. Версии «жилой единицы» Ле Корбюзье во Франции и Германии. Видовые точки: *а* – Нант-Резе[28]; *б* – Берлин[29]; *в* – Брие-ан-Форе[30]; *г* – Фирмини[31]
Fig. 19. Le Corbusier's residential unit in France and Germany: *a* – Nantes-Reuse; *b* – Berlin; *c* – Briey-en-Foret; *d* – Firminy

Однако дальше дело не пошло. Проблема заключалась в том, что невозможно, чтобы в доме, рассчитанном на 1500 чел., была хорошая библиотека или кинотеатр. Хотя бывают и исключения: «Интересно, что сегодня подобные идеи пытаются реализовывать в США. Жилые дома, про которые я писал, по сути всё те же машины для жилья, где есть всё необходимое жильцу – от бассейна и спортзала до кинотеатра и кафе…» [5].

Через некоторое время концепция «дома-города» начала масштабироваться в «район-город». Например, в Вене в 1970-х гг. появляется многофункциональный жилой комплекс Alterlaa. Это один из крупнейших жилых комплексов в Австрии. Он расположен в южной части Вены и занимает площадь 24 га. Все шесть многоэтажных домов этого комплекса представляют собой единое жилое пространство с развитой инфраструктурой. На крышах домов есть бассейны. Сами дома в нижней части расширяются книзу, и в этой расширяющейся части на каждом этаже есть большие балконы. Комплекс включает не только жилые дома почти на 10 тыс. чел., но и торговый центр, клиники, школы, детские сады, спортивные и игровые площадки, а также большой парк,

[28] URL: https://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_nantes_reze?ysclid=lz0wzaccgn440851800
[29] URL: https://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_berlin?ysclid= lz0x7 ojmoy538259916
[30] URL: https://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_briey_en_foret?ysclid=lz0y vhzr1q917672613
[31] URL: https://corbusier.totalarch.com/unite_d_habitation_firminy?ysclid=lz0z3p76hg92975432

который занимает больше половины площади микрорайона. Поэтому Alterlaa называют городом в городе (рис. 20).

Рис. 20. Многофункциональный жилой комплекс Alterlaa. Видовая точка[32]
Fig. 20. Multifunctional residential complex Alterlaa

Многие годы, прошедшие после строительства Марсельской «жилой единицы», этим домом восхищались архитекторы всего мира. Он расширил их представление об «идеальном жилье», сделав это понятие социальным. И пусть этот дом – больше экспериментальный объект, чем образец массовой застройки, но в любом случае это интересный пример организации жилого пространства и инфраструктуры: «Уже ни у кого больше не вызывает сомнений, что "жилая единица" оказала огромное влияние на формирование умов последующего поколения архитекторов. Она помогла освободить архитектора и планировщика от представления о доме как о простой сумме отдельных квартир и расширить его до более широких рамок коллективного человеческого жилища, в котором "социальное воображение" получило свое трехмерное воплощение. Лучшим доказательством признания мастерства великого зодчего XX в. служит тот факт, что марсельцы давно уже… именуют его просто "Дом Ле Корбюзье". И сегодня по числу посещений туристами это здание уступает лишь знаменитым замкам в долине Луары…»[33]. На многочисленных перекрестках города установлены указатели: «Дом Ле Корбюзье». Сейчас в нем живет около тысячи человек – архитекторы, студенты, художники, которые устраивают там инсталляции. Здесь организуют экскурсии для туристов, хотя работают далеко не все системы дома, которые в свое время создал Ле Корбюзье. Кафе посе-

[32] URL: https://dzen.ru/a/YA3PGBkkzAMx3y1H
[33] Страсти по Модулору Ле Корбюзье. URL: https://dzen.yandex.ru/media/arhi1/strasti-po-modulorule-korbiuze-5d14e5060e660100b0b5802e

щают лишь туристы, магазинами пользуются далеко не все жители дома, а один этаж вообще превратился в гостиницу.

Завершая данное исследование, необходимо отметить, что в своем уникальном проекте Марсельской «жилой единицы» Шарль-Эдуард постарался решить три очень важные проблемы, связанные с конструктивным решением и организацией внутреннего пространства этого многоэтажного здания.

1. В целях снижения общей стоимости работ французский зодчий был вынужден использовать в качестве основного строительного материала железобетон. Этот материал, в отличие от металлических каркасов, гарантировал более надежную защиту от пожаров. Однако марсельские строители, использовавшие примитивную опалубку, не смогли «отшлифовать» поверхность стен, сделать их более гладкими и «пластичными». Ле Корбюзье сумел по достоинству оценить светоотражающие свойства текстуры данного «грубого» материала и в дальнейшем использовал «фактурный» железобетон во многих других своих постройках.

2. Апробируя железобетонные каркасы на практике, зодчий пришел к логичному заключению, что из них можно делать «жилые ячейки» сравнительно небольших размеров. Оптимальным вариантом стал так называемый «стеллаж для бутылок», позволивший быстро заполнять его двухуровневыми квартирами-«дуплексами». Для декоративного украшения этой мелкоячеистой структуры Шарль-Эдуард воспользовался принципом лаконичной окраски веранд и балконов, жилых и технических помещений в 3–5 цветов по аналогии с картинами П.К. Мондриана. Размеры «жилых ячеек» соответствовали пропорциональной системе «Модулор», разработанной самим Ле Корбюзье.

3. Для разработки интерьеров квартир и мебели в этом здании зодчий привлек самых различных специалистов в области архитектуры и дизайна. Видимо, именно этот аспект вызвал массу негодований и критики в адрес Марсельской «жилой единицы» и ее главного создателя. Однако Ле Корбюзье, пользуясь поддержкой представителей государственной администрации, смог преодолеть эти нападки и создать еще четыре подобных здания во Франции и Германии.

В дальнейшем мы планируем опубликовать статью, посвященную монастырю Ла-Туретт в Лионе, выполненному по проекту Ле Корбюзье в 1961 г.

Список источников

1. *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 DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-24-43
2. *Чумакова К.* В гостях у Ле Корбюзье: Адреса его квартир, которые сдаются. URL: https://www.houzz.ru/statyi/v-gostyah-u-le-korbyuzye-adresa-ego-kvartir-kotorye-sdayutsya-stsetivw-vs~87433829?ysclid=lxyqsktb64852689296
3. *Машина для жизни*: дом, из которого выросла Каменная Горка. URL: https://realt.onliner.by/2017/04/07/corbusier
4. *Глушаков Дм.* Город внутри. Жилая единица от Корбюзье // project Bauhaus : [сайт]. URL: https://probauhaus.ru/unite-d-habitation/?ysclid=lxxz840 2il874370580
5. *Жилая единица* (Unité d'Habitation), Марсель, Франция. 1945–1952. URL: http://corbusier.totalarch.com/unite d_habitation_marseille
6. *Новоженова А.* Ле Корбюзье. Самые важные проекты самого важного архитектора XX века: от дома Центросоюза в Москве до города Чандигарх в Индии. URL: https://daily.afisha.ru/archive/gorod/archive/corbu-top-ten/

References

1. *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. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-24-43 (In Russian)
2. *Chumakova K.* Visiting Le Corbusier: Addresses of his apartments for rent. Available: www.houzz.ru/statyi/v-gostyah-u-le-korbyuzye-adresa-ego-kvartir-kotorye-sdayutsya-stsetivw-vs~87433829?ysclid=lxyqsktb64852689296 (In Russian)
3. A machine for living: the house from which Stone Hill grew up. Available: https://realt.onliner.by/2017/04/07/corbusier (In Russian)
4. *Glushakov D.* The City within. Residential unit from Corbusier. Available: https://probauhaus.ru/unite-d-habitation/?ysclid=lxxz840 2il874370580 (In Russian)
5. Housing unit (Unité d'Habitation), Marseille, France. 1945–1952. Available: http://corbusier.totalarch.com/unite d_habitation_marseille
6. *Novozhenova A.* Le Corbusier. The most important projects of the most important architect of the 20th century: from the house of Tsentrosoyuz in Moscow to the city of Chandigarh in India. Available: https://daily.afisha.ru/archive/gorod/archive/corbu-top-ten/ (In Russian)

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, oppopp2010@yandex.ru

Воевода Юлия Евгеньевна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, wailonger@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

Yulia E. Voevoda, Undergraduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, 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.

Статья поступила в редакцию 16.12.2024
Одобрена после рецензирования 27.12.2024
Принята к публикации 15.01.2025

Submitted for publication 16.12.2024
Approved after review 27.12.2024
Accepted for publication 15.01.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 44–54.

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 (1): 44–54.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 711.4
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-44-54 EDN: DIHVFN

ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОБЛИКА УЛИЦ КАК ЧАСТЬ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ОБРАЗА СОВРЕМЕННОГО ГОРОДА НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА МУРМАНСКА

Виктория Вадимовна Филимонова
Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия

Аннотация. Статья посвящена выявлению последовательности, благодаря которой формировались принципы уличной архитектуры как неотъемлемой, фундаментальной части становления образа современного мегаполиса, в качестве примера взят г. Мурманск.

Актуальность. Формирование существующего архитектурного облика улиц г. Мурманска является частью большого механизма развития города в целом. Данная тематика в настоящее время становится наиболее актуальной и значимой. Вопросы и задачи, нацеленные на формирование самобытного архитектурного облика города, требуют детализации и разработки нестандартных решений.

Целью научного исследования является разработка методического подхода в проектной деятельности, направленной на формирование архитектурно-художественного облика города и раскрытие фасадов зданий в сложных климатических условиях как части образного развития городского пространства.

Методы исследования. Применение нескольких подходов в познании. Первый подход – дедуктивное решение на основе построения концептуальных взаимосвязей. Данный метод позволит увидеть взаимосвязанную последовательность «от общего к частному». Второй подход – сравнительный анализ существующей городской среды, архитектурного облика улиц на примере г. Мурманска.

Р*езультаты*. Рассмотрены разные улицы города, их архитектурный облик, а также предложения по видоизменению с целью реформации, улучшения городской развёртки.

Раскрывается необходимость комплексного подхода не только к созданию комфортной городской среды, но и к её эстетическому оформлению.

Ключевые слова: архитектурный облик города, улица, городская среда

Для цитирования: Филимонова В.В. Формирование архитектурного облика улиц как часть процесса развития образа современного города на примере города Мурманска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 44–54. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-44-54. EDN: DIHVFN

© Филимонова В.В., 2025

ORIGINAL ARTICLE

ARCHITECTURAL IMAGE OF STREETS AS PART OF MODERN URBAN DEVELOPMENT ON THE EXAMPLE OF MURMANSK

Victoria V. Filimonova
Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

Abstract. The article identifies the principles of street architecture as an integral, fundamental part of the formation of the modern cities, studying the city of Murmansk as an example.

The relevance of research lies in the fact that the architectural image formation of streets in Murmansk is part of a large development mechanism of the city as a whole. This topic is becoming the most relevant and important today. Issues and tasks aimed at shaping the distinctive architectural appearance of the city always require detailed elaboration and the development of non-standard solutions.

Purpose: The development of the methodological approach to design activities in the architectural field and the study of facades in difficult climatic conditions as part of the imaginative development of urban space.

Methodology: The deductive solution based on the construction of conceptual relationships. This method allows to understand the sequence of the general to the particular. The comparative analysis of the urban environment and architectural image of streets in Murmansk.

Research findings: The architectural image of several streets of the city are studied; modifications are proposed to reform and improve the urban layout.

Value: The integrated approach is used to create not only a comfortable urban environment, but also its aesthetic design.

Keywords: architectural image, street, urban development

For citation: Filimonova V.V. Architectural Image of Streets as Part of Modern Urban Development on the Example of Murmansk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 44–54. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-44-54. EDN: DIHVFN

Введение

Объект исследования – образное и архитектурно-художественное представление города в мире технологического процесса, осмысление его структурной наполненности. Предмет исследования – конкретизация важности художественного проявления облика улиц как пути развития городской структуры в целом, рассмотренная на примере г. Мурманска.

Задачи исследования:

– выявить значимость эстетического начала как связующего звена в архитектурном проектировании и реконструкции жилого фонда и формировании пространства улиц;

– изучить и оценить существующее архитектурное и градостроительное положение г. Мурманска;

– рассмотреть и найти решение имеющихся проблем в сфере архитектурной организации облика улиц города.

Важно проследить путь формирования городской архитектуры в г. Мурманске. Город имеет нестандартную планировочную структуру и географические показатели, влияющие на архитектурно-градостроительную ситуацию.

Именно поэтому необходимо развивать модернизированные подходы к видоизменению улиц города в частности и пространства в целом.

Систематизация ключевых задач позволит оценить в полной мере ситуацию в области архитектурно-художественного облика улиц в Мурманске и задать векторы перспективных направлений во взаимосвязи образного представления самого города в целом.

Значение улиц в комплексном совершенствовании городского образа

Современный город – это сложный комплексный механизм, в котором каждый компонент создаёт внешний облик и «внутреннюю» городскую среду, её принято называть «интерьером города». Именно те образы, благодаря которым представлен мегаполис, история его формирования, и есть архиважные структурные задачи в архитектурном проектировании. Решающее значение в создании городского образа приобретает эстетическое восприятие улиц. Важной частью градостроительной структуры является улица, т. к. именно она связывает компоненты, доминанты и участвует в построении транспортных связей. Городская среда создаёт настроение, впечатление, атмосферу для жителей населённого пункта и притягивает туристические потоки. Становление городской средовой структуры невозможно без переосмысления архитектурного и эстетического облика улиц [1].

Времена меняются, вкусы, стили, но неизменно одно – архитектура города задаёт настроение, и исторический путь места можно понять по его главным улицам [2]. Важность сохранения культурного наследия, культурных особенностей в историческом ядре города, разработка контролируемого регламента этажности застройки, создание новых концепций в проектировании фасадов зданий, ансамблей – это важнейшие направления создания целостного городского планирования.

Поскольку город – это механизм с постоянным стремлением к развитию, необходимо это поддерживать путём создания конкурентоспособной среды. Гению французской прозы Оноре де Бальзаку принадлежит высказывание: «Архитектура – выразительница нравов». Данное ёмкое выражение абсолютно точно передает мысль, что именно архитектурная выраженность городских улиц помогает определить перспективы и векторы для дальнейшего развития.

Факторы, влияющие на становление городского архитектурного облика

Формирование и развитие городского фасада идёт поэтапно со сменой исторических времён за счет влияния различных сфер общества – социальной, политической, географической, обязательно культурной и многих других [3].

Городской облик – это архитектурная визуализация, исходя из которой мы делаем вывод о населённом пункте, стиле архитектуры и эстетике. Становление городского облика происходит благодаря слиянию нескольких факторов, например: наследие истории, географическое местоположение, культурные и традиционные аспекты, особенности менталитета [4]. Характерные черты, индивидуальность городского поселения можно определить с помощью анализа таких элементов его архитектуры, как соборы, храмы, мосты, памятники, арки, фонтаны и другие компоненты инфраструктуры. Важнейшая составляю-

щая наследия архитектуры и культуры – памятники и центральные улицы города, благодаря им происходит сохранение и передача будущему поколению культурных, исторических и традиционных ценностей места. Именно исторические здания становятся уникальной доминантой в общей структуре, являются символами городского культурного наследия. Городской облик формируется и благодаря различным стилям архитектуры, особенностям декора в городской застройке, уместной интеграции их в городскую среду.

Географическое местоположение населённого пункта нередко является основополагающим фактором, влияющим на городское пространство, его улицы. Водоёмы, рельеф, растительность при планировании и зонировании оказывают влияние на культурный и архитектурный ландшафт и дизайн города.

Политическое управление и идея городского архитектурного облика тесно взаимосвязаны, т. к. при рациональном использовании территории получают согласованную среду и слаженную инфраструктуру. Существующая стандартизированность принципов архитектуры оказывает влияние на решения в формировании городской среды.

Культурная наполненность местности, наличие определенных традиций оказывают мощное влияние как на весь облик города, так и на локальные улицы. Искусство отражается в визуальной и архитектурной составляющих городской среды.

Все вышеперечисленные факторы определяют городской облик, задают перспективную динамику в плане развития.

Создание динамически интересной, самобытной архитектуры – это то, что будет радовать потомков десятки и сотни лет. Городской архитектурный облик создаётся из большого количества частей, и улицы – ключевой элемент этого механизма. Можно точно сказать, что умение создать образное восприятие сложного городского целостного пространства – это наивысшая цель методики архитектора и наиглавнейшее проявление способностей творчества зодчего. Диалектику сочетаний зданий с карнизами, колоннами, пилястрами, разнообразными арками и зданий, являющихся фоновой застройкой, сложно формализовать, собрать в единую формулу или схему. Значения перечисленных культурных элементов зависят от знания культурного слоя и гениального творчества создателей архитектуры. Именно облик городской среды, состоящий непосредственно из визуального раскрытия улиц, отображает культурный уровень жителей и положение социальных слоёв, повествует об исторических особенностях места [5].

Важно отметить, что визуальное впечатление от улиц складывается в первую очередь от архитектурно-художественного фасада, а также важнейших решений ландшафтного благоустройства: озеленение, тротуары, лавки, урны, вазоны. Каждая деталь, каждый элемент благоустройства играет роль поддерживающего значения для видового раскрытия. Взаимосвязь стилевых решений – это тот важнейший фактор, который оказывает влияние на восприятие пространства, эмоционально воздействует на население. Дополняет и усиливает эту взаимосвязь восприятие материалов, текстур, это те неотъемлемые аспекты архитектурной целостности, без которых не представляется возможным ощутить себя в определённой культурной среде.

Совместная работа местных жителей, администрации муниципалитета, частных компаний влияет на сохранение и улучшение самобытности, привлекательности городской среды и уровень комфорта жизни.

Облик и характерные особенности улиц в г. Мурманске, пути развития

Единственным крупным городом, который находится за Северным полярным кругом, является Мурманск, при этом он стал одним из крупных портов в России. Градостроительная и архитектурно-планировочная структура города складывалась годами и имеет свои особенности и большой нераскрытый потенциал развития.

Важно сделать анализ архивных исторических данных, оценить планировочную структуру города в целом и современного облика улиц, климатические особенности для внедрения и применения методологических принципов по созданию проектных решений и поиска путей развития [6].

Поскольку Мурманск – это северный город, то важно отметить, что в условиях Севера художественную выразительность и своеобразие облика застройки, улиц, городской среды определяют два фактора – природа и принципы градообразования. Сложившаяся характерная городская застройка – это пример контрастного противопоставления жилых объектов с ветрозащитными приёмами планировки природному ландшафту [7]. Террасная пространственная организация позволяет увидеть красивую панораму, а четкое функциональное зонирование в разных уровнях промышленной, портовой и жилой зоны благотворно воздействует на все процессы жизнеобеспечения в городе (рис. 1).

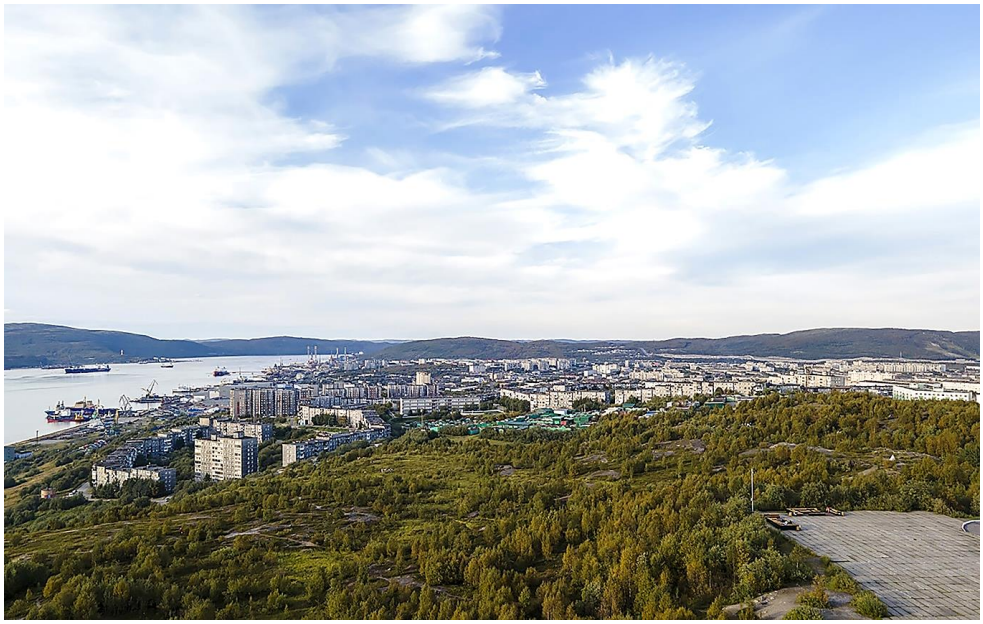


Рис. 1. Панорамно-видовое раскрытие г. Мурманска[1]
Fig. 1. Panoramic view of Murmansk

[1] URL: https://russiatrek.org/blog/cities/murmansk-the-views-from-the-heights/

Географическое положение Мурманска, а именно расположение среди сопок и акватории Кольского залива, оказало большое влияние на структурно-планировочную основу города. Залив является композиционным центром и определяет городское пространство, построение улиц, расположение кварталов.

Уличная и транспортная сеть имеет вытянутый характер и располагается вдоль Кольского залива, городские улицы из-за особенностей рельефа имеют меридиональное направление.

В ходе исследования был произведён градостроительный и архитектурно-планировочный анализ плана города. В результате удалось выявить зоны для предполагаемой реконструкции. Проведена типология зон по территориальной удалённости от центральной части города:

– застройка кварталов исторического городского ядра (основу данного типа застройки составляют «сталинки»);

– жилая застройка, которая удалена от центральной части города (панельные дома и аварийные деревянные дома);

– периферийная часть города, которая представлена панельными домами.

Рассмотрим застройку улиц центральной части г. Мурманска. Улица Ленина выступает в роли парадной и представительной (рис. 2). Вторая важная связь – это улицы Челюскинцев – Коминтерна – Шмидта – проспект Кирова.

Рис. 2. Проспект Ленина[2]
Fig. 2. Lenin Avenue

На рис. 2 отображена архитектура одной из главных улиц г. Мурманска: в основном застройка в стиле сталинской эпохи, здания построены до 1960-х гг. (до начала «борьбы с излишествами» в годы правления Н. Хрущёва). Именно исторический центр г. Мурманска выделен более ярко в общем архитектурно-ху-

[2] URL: https://transphoto.org/photo/07/62/50/762507.jpg

дожественном облике, здесь хочется рассматривать каждый дом, каждую его деталь. Центральное ядро отражает историю Мурманска, ведь город сравнительно молодой, однако в послевоенные годы его пришлось практически полностью восстанавливать.

На рис. 3 отображено видовое раскрытие центральной части города: жилые дома, скверы, имеются доминанты – гостинично-деловой центр «Арктика», площади.

Рис. 3. Панорамное раскрытие центральной части г. Мурманска[3]
Fig. 3. Panoramic view of the Murmansk center

Главным украшением проспекта Ленина являются два дома «Мурманрыбы», зеркально повторяющие друг друга, дома известны как «капитанские», т. к. задумывались по проекту для моряков.

На рис. 4 видно, что по архитектуре здания также принадлежат к «сталинской застройке», по своему образному представлению они являются доминантами среди других зданий. Яркость фасадов в плане цвета и деталей, при этом особая сдержанность и строгость создают парадный вид улицы и рассказывают об ее историческом формировании.

Таким образом, анализ центральных улиц г. Мурманска позволяет сделать вывод, что к архитектурно-художественным особенностям застройки можно отнести: сочетание фрагментов стиля ар-деко, конструктивизма и классицизма, добавление триумфального характера. При этом построек повышенной этажности – единицы, они являют собой направляющие точки и центры притяжения. Всё это позволяет создать атмосферу, рассказать историю места, почувствовать дух культуры [8].

[3] URL: https://img.geliophoto.com/murmansk/13_mur.jpg

Рис. 4. «Капитанские» дома в г. Мурманске[4]
Fig. 4. "Captain's" houses in Murmansk

К путям развития центральной части города можно отнести:

– реконструктивные мероприятия, направленные на формирование колористического единства композиции;

– поддержание и развитие скверов, площадей;

– создание дополнительных мест притяжения для туристов.

Жилая застройка, которая является периферийной, делится на два типа: панельная застройка и аварийные дома из дерева. На рис. 5 представлены дома из дерева, находящиеся в зоне, удалённой от центральной. Данные жилые здания пойдут под снос, т. к. они являются аварийными и не подлежат восстановительным работам. Перспективные направления в развитии таких улиц – это снос ветхого жилья и строительство новых жилых кварталов с учётом существующего градостроительного положения. Именно новые здания будут наиболее актуально презентовать данные улицы.

Основной проблемой жилых улиц с панельной застройкой является визуально-эстетический вид. Улицы превратились в фоновую застройку без каких-либо дополнительных акцентных решений. На рис. 6 представлена панорама преимущественно с панельной застройкой. Путь решения по развитию таких улиц – это применение колористических приёмов, что позволит цветом выделить доминантные элементы, также возможно применить композитные материалы (например, декоративные панели) для облицовки фасадов [9].

[4] URL: https://www.mvestnik.ru/mvfoto/2020/12/18/15_mur.jpg

Рис. 5. Пример деревянных домов довоенных времён[5]
Fig. 5. Wooden houses from pre-war times

Рис. 6. Панельная застройка[6]
Fig. 6. Slab buildings

[5] URL: https://img4.tourbina.ru/photos.3/1/0/1029461/big.photo/Derevyashki.jpg
[6] URL: https://sun9-42.userapi.com/impg/nxk8Y4xv5Mgxmg9qhjur2ZPL4-8d9FSf0qEvSA/doeamYwqZWI.jpg?size=1280x720&quality=96&sign=8c48bdba6c50c44fc44b935f945dcadf&c_uniq_tag=Frv2nq8bU7UKBDrBzcnP4Jnh-EbL58M_OHU92NWRmsI&type=album

Добавление цветовых акцентов позволит создать ассоциативные элементы улиц, которые будут работать на развитие социальных и культурных граней в городской среде Мурманска [10].

Выводы исследования

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Одна из первостепенных задач в архитектурном проектировании – формирование эстетического облика улиц города. Улица является структурной единицей в создании общего потенциала и раскрытия города и формирует впечатление, создаёт атмосферу, задаёт ритм, привлекает или отталкивает. Для развития городской среды в целом нужно действовать от локального к общему. Только так будет запущен процесс развития.

2. Видовое раскрытие улицы в городе – это процесс динамичный, связанный с поиском нового при сохранении старого, это та самая отправная точка, с которой начинается процесс архитектурно-градостроительного проектирования. Важно создавать условия для развития градостроительной политики, улучшения облика города, создания новых районов и, как следствие, появления новых знаковых улиц.

3. Улица – это структурная часть, являющаяся звеном в создании потенциала и устойчивого развития в целом. У всех ярких улиц есть историческая составляющая и отличительные особенности, которые присущи исключительно данному городу, улица – это создание ассоциаций.

4. Без развития архитектурно-художественного облика улиц невозможен процесс развития облика города, т. к. городская среда состоит из множества компонентов, главным из них являются улицы.

5. На примере г. Мурманска рассмотрены ключевые и значимые улицы и дана оценка внешнему эстетическому облику. Мурманск является достаточно перспективным для развития архитектуры, культуры, это город с необычной историей, климатическими условиями. Можно чётко выделить аспекты, повлиявшие на архитектуру его сооружений, – это климат, история и градостроительная политика.

6. Отмечена важность концентрации внимания не только на центральных улицах города, но и на периферийных районах. Для того чтобы добиться единого композиционного эффекта, районы города рассматриваются в совокупности, на основе принципа дополнения и принципа вычленения доминант и направляющих.

7. Развитие облика современного города должно строиться на поисках нового, с применением принципа сохранения ценного исторического наследия. Создание условий для устойчивого развития с учётом потребностей горожан, строительство новых районов города и как итог формирование знаковых улиц.

8. Рассмотрев архитектуру г. Мурманска, можно отметить, что Север России является практически нетронутым масштабными реконструктивными мероприятиями, следовательно, опираясь на данное исследование, можно рассмотреть варианты реновации архитектурной среды в городе.

Список источников

1. *Зитте К.* Художественные основы градостроительства / пер. с нем. Я. Крастиньша. Москва : Стройиздат, 1993. 255 с.

2. *Николаев В.Г.* Патрик Геддес: у истоков социологии города и городских исследований // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Сер. 11: Социология. 2021. № 4. С. 164–180. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/patrik-geddes-u-istokov-sotsiologii-goroda-i-gorodskih-issledovaniy
3. *Кристофер Александер и др.* Язык шаблонов: города, здания, строительство / пер. с англ. И. Сыровой. Москва : Студия Артемия Лебедева, 2014. 1093 с.
4. *Каган М.С.* Морфология искусства. Историко-теоретическое исследование внутреннего строения мира искусств. Ленинград : Искусство, 1972. 440 с.
5. *Коротковский А.Э.* Основы архитектурной композиции. Москва : МАРХИ, 1974. 111 с.
6. *Иконников А.В.* Художественный язык архитектуры. Москва : Искусство, 1985. 175 с.
7. *Яргина З.Н.* Эстетика города. Москва : Стройиздат, 1991. 366 с.
8. *Глазычев В.Л.* Урбанистика. Москва : Европа, 2008. 220 с.
9. *Косицкий Я.В.* Композиционные основы планировочной структуры города. Москва : МАРХИ, 1985. 124 с.
10. *Колясников В.А.* Современная теория и практика градостроительства: территориальное планирование городов. Екатеринбург : Архитектон, 2010. 406 с.

REFERENCES

1. *Zitte K.* Artistic Foundations of Urban Planning Moscow: Stroyizdat, 1993. 255 p. (Russian translation)
2. *Nikolaev V.G.* Patrick Geddes: At the Origins of Urban Sociology and Urban Research. *Otechestvennaya i zarubezhnaya literatura. Ser. 11: Sotsiologiya*. 2021; (4): 164–180. Available: https://cyberleninka.ru/article/n/patrik-geddes-u-istokov-sotsiologii-goroda-i-gorodskih-issledovaniy (In Russian)
3. *Christopher A., et al.* A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction. Moscow: Artemy Lebedev Studio, 2014. 1093 p. (Russian translation)
4. *Kagan M.S.* Morphology of Art. Historical and Theoretical Study of the Internal Structure of the World of Arts. Leningrad: Iskusstvo, 1972. 440 p. (In Russian)
5. *Korotkovsky A.E.* Fundamentals of Architectural Composition. Moscow, 1974. 111 p. (In Russian)
6. *Ikonnikov A.V.* The Artistic Language of Architecture. Moscow: Iskusstvo, 1985. 175 p. (In Russian)
7. *Yargina Z.N.* Aesthetics of the City. Moscow: Stroyizdat, 1991. 366 p. (In Russian)
8. *Glazychev V.L.* Urbanistics. Moscow: Evropa, 2008. 220 p. (In Russian)
9. *Kositsky Ya.V.* Compositional Foundations of the City Planning Structure. Moscow, 1985. 124 p. (In Russian)
10. *Kolyasnikov V.A.* Modern Theory and Practice of Urban Planning: Spatial City Planning. Yekaterinburg: Architecton, 2010. 406 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Филимонова Виктория Вадимовна, доцент, Мурманский арктический университет, 183038, г. Мурманск, ул. Капитана Егорова, 15, viktoria_filimonova@bk.ru

Author Details

Victoria V. Filimonova, A/Professor, Murmansk Arctic University, 15, Kapitan Egorov Str., 183038, Murmansk, Russia, viktoria_filimonova@bk.ru

Статья поступила в редакцию 12.08.2024
Одобрена после рецензирования 06.12.2024
Принята к публикации 16.12.2024

Submitted for publication 12.08.2024
Approved after review 06.12.2024
Accepted for publication 16.12.2024

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 55–69.

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 (1): 55–69.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 711.4-163
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-55-69 EDN: DKKYEJ

АНАЛИЗ И РАНЖИРОВАНИЕ МИКРОРАЙОНОВ ГОРОДА НОВОСИБИРСКА ПО КОМФОРТНОСТИ ПРОЖИВАНИЯ

Валерия Сергеевна Бызова, Олеся Олеговна Смолина
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Формирование комфортной среды жизнедеятельности для человека – задача актуальная и значимая. Данное исследование позволит определить микрорайоны г. Новосибирска с наиболее комфортными условиями проживания и микрорайоны, нуждающиеся в улучшении существующей инфраструктуры и в реконструкции.

Целью исследования является комплексная оценка комфортности проживания в микрорайонах Новосибирска, базирующаяся на выявлении наличия и доступности объектов социального и культурно-бытового обслуживания (образования, воспитания, рекреации, здравоохранения, торговли и развлечений, транспорта, культуры и спорта). Анализируются текущее состояние и перспективы развития этих объектов с учетом градостроительных планов, качество архитектурной среды, уровень благоустройства (включая доступность для маломобильных групп населения) и озеленение территорий микрорайонов.

Методы исследования. Выполнен терминологический, хронологический и картографический анализ микрорайонов на территории г. Новосибирска в период с 1893 по 2019 г. Осуществлена оценка микрорайонов на наличие в радиусе доступности объектов социального и культурно-бытового обслуживания и объектов транспортной инфраструктуры. Проведен анализ комфортности проживания в микрорайоне с учетом уровня благоустройства и процента озеленения территории.

Новизна исследования. Проведены авторская оценка и ранжирование микрорайонов г. Новосибирска на соответствие комфортности проживания.

Результаты. В результате исследования выявлены критерии оценки комфортности микрорайонов г. Новосибирска, проведено ранжирование микрорайонов по степени комфортности проживания.

***Ключевые слова*:** градостроительство, микрорайон, комфорт, застройка, принципы

Для цитирования: Бызова В.С., Смолина О.О. Анализ и ранжирование микрорайонов города Новосибирска по комфортности проживания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 55–69. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-55-69. EDN: DKKYEJ

© Бызова В.С., Смолина О.О., 2025

ORIGINAL ARTICLE

COMFORTABLE LIVING ANALYSIS AND RANKING OF RESIDENTIAL DISTRICTS IN NOVOSIBIRSK

Valeria S. Byzova, Olesya O. Smolina
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia

Abstract. The comfortable living environment is a relevant and important task. This study helps to determine which districts in Novosibirsk have the most comfortable living conditions, and which of them require improvement of the infrastructure and reconstruction.

Purpose: The comprehensive analysis of comfortable living conditions in Novosibirsk districts based on the availability of social and cultural services (educational, upbringing, recreational, health care, shopping and entertainment, transport hubs, cultural and sports facilities) and accessibility of these facilities today and in the future (taking into account planning projects), the architectural environment of districts, including an accessible environment for people with disabilities, as well as the quality and representativeness of landscaping.

Methodology: The terminological, chronological and cartographic analysis of districts in Novosibirsk in the period from 1893 to 2019. The analysis of the availability of social and cultural services, such as educational, upbringing, recreation, healthcare, culture and sports facilities, shopping and entertainment and transport infrastructure facilities: transport hubs and accessibility of these facilities. The analysis of comfortable living conditions in the district with respect to the improvement and percentage of landscaping.

Research findings: Assessment criteria for the comfort of districts in Novosibirsk are identified, and districts are ranked by the most comfortable living.

Value: The assessment and ranking of Novosibirsk districts for compliance with the comfort living.

Keywords: urban planning, district, comfort, development, principles

For citation: Byzova V.S., Smolina O.O. Comfortable Living Analysis and Ranking of Residential Districts in Novosibirsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 55–69. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-55-69. EDN: DKKYEJ

Введение

Современные градостроительные исследования сосредоточены на решении различных задач. Среди них: проектное функциональное зонирование городских территорий, стратегическое градостроительное и институциональное планирование, партисипаторное бюджетирование. При этом учитываются экологические, историко-культурные, социально-экономические и другие факторы. Большое значение придаётся формированию комфортной и безопасной городской и сельской среды. Исследования должны учитывать интересы жителей, научных и общественных институтов, бизнеса, позволяющие выявить специфические особенности территории.

Целью настоящего исследования является комплексная оценка комфортности проживания в микрорайонах г. Новосибирска. Оценка базируется на анализе наличия объектов социального и культурно-бытового обслуживания (объекты образования, воспитания, рекреации, здравоохранения, торгово-развлека-

тельные объекты, ТПУ (транспортно-пересадочные узлы), объекты культуры и спорта), доступности этих объектов на территории г. Новосибирска на сегодняшний день и в перспективе развития (с учетом проектов планировки), определении архитектурной среды микрорайонов, уровня благоустройства (в том числе доступной среды для МГН), а также качества и репрезентативности озеленения территории микрорайона. Для достижения цели исследования решены следующие задачи:

1. Комплексный анализ микрорайонов по следующим критериям: наличие объектов социального и культурно-бытового обслуживания, таких как объекты образования, воспитания, рекреации, здравоохранения, культуры и спорта, торгово-развлекательные объекты, а также объектов транспортной инфраструктуры – ТПУ г. Новосибирска.

2. Определение наиболее комфортных и менее комфортных для проживания микрорайонов на территории г. Новосибирска в рамках хронологических границ с 1893 по 2019 г.

3. Определение качества благоустройства микрорайонов г. Новосибирска по авторской балльной системе.

4. Выявление процента озеленения микрорайонов от общей площади.

Новизна исследования заключается в проведенной авторской оценке и ранжировании микрорайонов г. Новосибирска по соответствию степени комфортности проживания.

Методология и методика исследования

В настоящем исследовании проведен терминологический, хронологический и картографический анализ микрорайонов на территории г. Новосибирска, охватывающий период с 1893 по 2019 г. Проведена оценка микрорайонов на наличие в радиусе доступности объектов социального и культурно-бытового обслуживания, таких как объекты образования, воспитания, рекреации, здравоохранения, культуры и спорта, торгово-развлекательные объекты, а также объектов транспортной инфраструктуры – ТПУ г. Новосибирска, определена доступность этих объектов на территории. Проведен анализ комфортности проживания в микрорайоне с учетом уровня благоустройства и процента озеленения территории.

Теоретическую базу настоящей работы составили труды таких исследователей, как А.Е. Гашенко [1], Н.П. Журин [2], С.Н. Баландин [3], В.Ю. Спиридонов [4].

Основные результаты исследования

В начале исследования рассмотрим основные понятия.

Микрорайон – это элемент планировочной структуры городского и сельского поселения, на территории которого размещается преимущественно жилая застройка, в границах которого обеспечивается обслуживание населения объектами повседневного и периодического спроса, включая общественные пространства и озелененные территории, состав, вместимость и размещение которых рассчитаны на жителей микрорайона [5, с. 4].

Комфорт – это состояние окружающей среды, при котором человек чувствует себя уютно, имеет удобный, наиболее безопасный и рациональный доступ к ресурсам среды для удовлетворения своих материальных и духовных потребностей.

В последнее время архитекторы, проектировщики и дизайнеры уделяют особое внимание созданию гармоничной среды для проживания людей. Вопросы обеспечения благоприятной, безопасной и комфортной среды стали актуальными как для представителей власти, так и для жителей городов.

Право на благоприятную окружающую среду является одним из основных конституционных прав человека. Поэтому в современном проектировании жилой среды особое внимание уделяется созданию комфортных условий для работы и отдыха граждан [6, с. 119].

В основе исследования лежит изучение особенностей формирования застройки микрорайонов на территории Новосибирска XX–XXI вв. В истории советского и постсоветского градостроительства выделяют основные модели формирования жилой застройки города: квартал, укрупненный квартал, микрорайон, высотные жилые комплексы и точечная застройка. Для всех рассматриваемых моделей характерны следующие общие приёмы планировки застройки: периметральная (по периметру участка), групповая (в виде групп зданий), строчная (здания расположены в ряд), свободная (без определённой системы) и комбинированная (сочетание разных подходов). Эти приемы различаются расположением домов друг относительно друга, а также расположением по отношению к линии застройки и красной линии улиц. В Новосибирске преобладающим является микрорайонный тип застройки со строчным планировочным приемом [7, с. 100]. В начале XX в. застройка Новосибирска состояла из кварталов площадью 1,5–2 га. По мере роста города характер кварталов менялся, особенно в центральной части, где сосредоточены коммерческие, административные и учебные заведения.

В 1950-е гг. город функционально разделился на деловой центр и спальные районы по принципу микрорайонирования. Вместо квартальной жилой застройки была адаптирована концепция «микрорайон», предложенная зарубежными архитекторами. Суть этой концепции – в создании условий, позволяющих жителям удовлетворять свои социально-бытовые и культурные потребности непосредственно на территории микрорайона, исключая необходимость длительных перемещений. Позже идеология строительства стала общей, и в строительных нормах и правилах были закреплены нормативы по количеству магазинов, площадок для отдыха, занятий спортом, развлечений, мест для общения и озеленённых пространств. Основным преимуществом микрорайона стало обеспечение безопасности передвижения жителей благодаря отсутствию транзитных магистралей на территории. Таким образом, был разработан новый подход к формированию жилой среды, ориентированный на создание комфортных и безопасных условий для жизни человека [8, с. 28].

В настоящем исследовании рассмотрены 44 микрорайона в десяти районах Новосибирска: Дзержинский, Железнодорожный, Заельцовский, Калининский, Кировский, Ленинский, Октябрьский, Первомайский, Советский, Центральный (рис. 1).

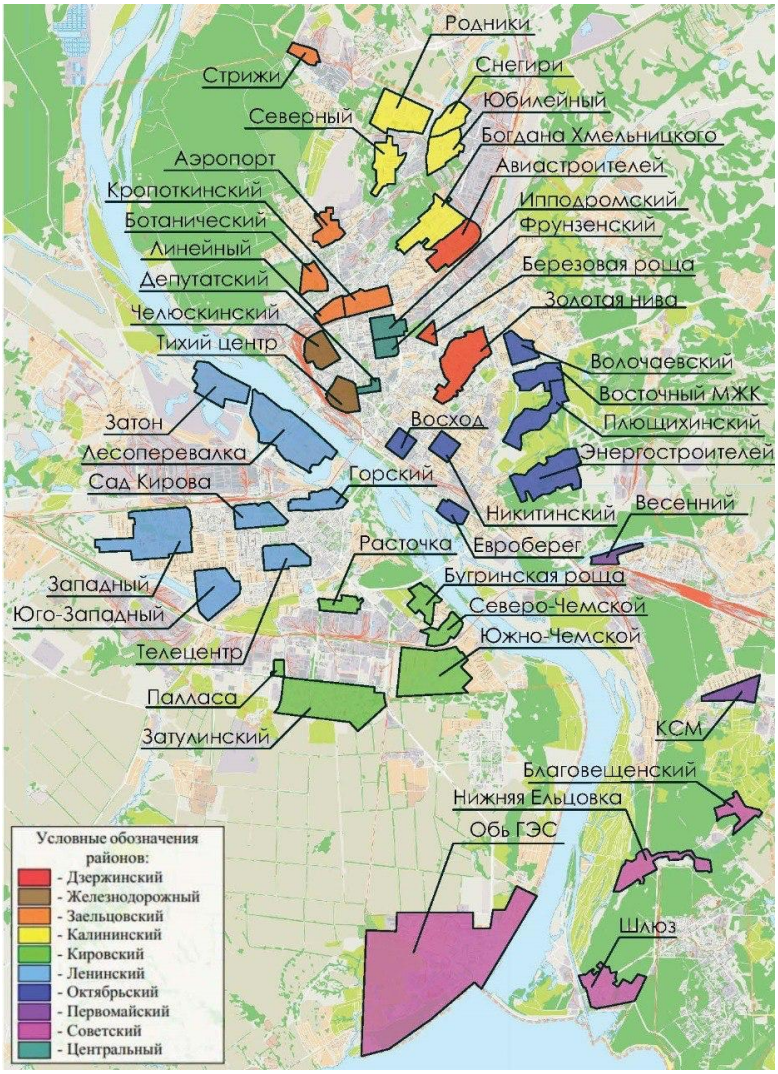


*Рис. 1. Р*асположение микрорайонов на карте Новосибирска[1]
Fig. 1. Location of districts on the map of Novosibirsk

Критерии комфортного проживания в микрорайонах г. Новосибирска с учетом наличия объектов социального и культурно-бытового обслуживания

Градостроительный анализ проводился с учетом соответствия концепции «микрорайона», предполагающей возможность удовлетворения основных социально-бытовых и культурных потребностей населения в границах данного территориального образования. При проведении анализа особое внимание уделялось наличию следующих объектов инфраструктуры: школ, детских садов, рекреационных зон, поликлиник, ТПУ, торговых объектов, а также учреждений

[1] URL: https://fedoroff.net/load/maps/karta/karta_novosibirska/90-1-0-1553

культуры и досуга. Эти элементы составляют неотъемлемую часть комфортной городской среды и обеспечивают высокое качество жизни в микрорайоне.

В число комфортных для проживания с учетом наличия объектов социального и культурно-бытового обслуживания вошли микрорайоны: Авиастроителей и Золотая Нива (Дзержинский район), Тихий центр и Челюскинский (Железнодорожный район), Ботанический, Аэропорт и Кропоткинский (Заельцовский район), Снегири и Родники (Калининский район), Затулинский и Бугринская роща (Кировский район), Лесоперевалка, Сад Кирова и Юго-Западный (Ленинский район), Восход и Никитинский (Октябрьский район), КСМ (Первомайский район), Обь ГЭС, (Советский район), Фрунзенский и Депутатский (Центральный район). Эти микрорайоны имеют на территории основные объекты социального, бытового и культурного обслуживания жителей (табл. 1).

Таблица 1

Комфортные для проживания микрорайоны с учетом наличия объектов социального и культурно-бытового обслуживания Новосибирска, ранжированные по районам города

Table 1

Comfortable residential districts with account for availability of social and cultural facilities in Novosibirsk

Микрорайоны	Дата основания	Район в Новосибирске	Наличие объектов социального и культурно-бытового обслуживания						
			Школа	Детский сад	Объекты рекреации	Поликлиника	ТПУ	Торговые объекты	Объекты культуры и спорта
Авиастроителей	1932	Дзержинский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Золотая Нива	1980	Дзержинский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Тихий центр	1893	Железнодорожный	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Челюскинский	1970	Железнодорожный	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ботанический	1960	Заельцовский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Аэропорт	1983	Заельцовский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Кропоткинский	1990	Заельцовский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Снегири	1978	Калининский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Родники	1990	Калининский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Затулинский	1960	Кировский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Бугринская роща	1970	Кировский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Лесоперевалка	1930	Ленинский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Сад Кирова	1930	Ленинский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Юго-Западный	1981	Ленинский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Восход	1950	Октябрьский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Никитинский	1970	Октябрьский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
КСМ	1960	Первомайский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Обь ГЭС	1950	Советский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Фрунзенский	1973	Центральный	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

В ходе проведённого анализа были выявлены микрорайоны Новосибирска, в которых обеспечено полное наличие объектов социального и культурно-бытового назначения (табл. 1). Каждый из указанных микрорайонов получил максимальную оценку в 7 баллов по критерию обеспеченности объектами со-

циальной и культурной инфраструктуры. Последующий анализ критериев комфортного проживания будет осуществляться на основании данных этих микрорайонов. Для наглядности каждый микрорайон в таблице выделен цветом, соответствующим конкретному району г. Новосибирска, ранее обозначенному на карте города.

Также рассматривались микрорайоны Березова роща в Дзержинском районе, Стрижи в Заельцовском районе, Богдана Хмельницкого и Северный в Калининском районе, Северо-Чемской, Расточка и Палласа в Кировском районе, Горский и Затон в Ленинском районе, Волочаевский, Восточный МЖК и Евроберег в Октябрьском районе, Весенний в Первомайском районе, Шлюз в Советстком и Ипподромский в Центральном районах, но в список исследуемых они не вошли (табл. 2).

Таблица 2

Наименее комфортные для проживания микрорайоны с учетом наличия объектов социального и культурно-бытового обслуживания г. Новосибирска, ранжированные по составу объектов

Table 2

Least comfortable residential districts accounting for social and cultural facilities in Novosibirsk, ranked by facilities

Микрорайоны	Дата основания	Район в Новосибирске	Наличие объектов социального и культурно-бытового обслуживания							Баллы
			Школа	Детский сад	Объекты рекреации	Поликлиника	ТПУ	Торговые объекты	Объекты культуры и спорта	
Березовая роща	2011	Дзержинский	✓	✓	✓		✓	✓	✓	6
Стрижи	2012	Заельцовский	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	6
Богдана Хмельницкого	1947	Калининский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	6
Северный	1957	Калининский	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	6
Северо-Чемской	1940	Кировский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	6
Расточка	1945	Кировский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	6
Палласа	1991	Кировский	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	6
Горский	1991	Ленинский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	6
Затон	1909	Ленинский	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	6
Волочаевский	1975	Октябрьский	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	6
Восточный МЖК	1992	Октябрьский	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	6
Евроберег	2019	Октябрьский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	6
Весенний	2005	Первомайский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	6
Шлюз	1958	Советский	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	6
Ипподромский	1932	Центральный	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	6

Критерии комфортного проживания в микрорайонах г. Новосибирска с учетом нормативной доступности объектов социального и культурно-бытового обслуживания

Помимо наличия объектов социального и культурно-бытового обслуживания, важную роль играет их доступность на территории микрорайона. Согласно СП 42.13330.2016 «Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89*», нормативное расстояние составляет: до школы – 500 м, до детского сада – 300 м,

до объектов рекреации – 300 м, до больницы – 500 м, до остановки – 500 м, до магазина – 500 м, до объектов культуры и спорта – 500 м [9].

В исследуемых микрорайонах был проведен полный анализ территорий с точки зрения доступности объектов социального и культурно-бытового обслуживания, таких как объекты образования, воспитания, рекреации, здравоохранения, культуры и спорта, торгово-развлекательные объекты, а также объектов транспортной инфраструктуры – ТПУ г. Новосибирска. Также учитывалась доступность среды для маломобильных групп населения и наличие придомовых площадок для разных групп населения: детских и спортивных площадок и зоны отдыха для взрослых. За соответствие нормам каждого из пунктов микрорайону присуждался 1 балл (максимальное количество баллов за анализ доступности территории – 11).

В результате анализа было выявлено, что только микрорайоны Тихий центр, Челюскинский, Авиастроителей и Восход соответствуют нормам доступности территории (табл. 3).

Таблица 3

Анализ состава доступности территории комфортных микрорайонов г. Новосибирска

Table 3

Accessibility of comfortable districts in Novosibirsk

Микрорайоны	Дата основания	Район в Новосибирске	Состав доступности территории								Наличие придомовых площадок			Баллы
			Доступность МГН	Пешеходная доступность до объектов социального и культурно-бытового обслуживания							Детские площадки	Спортивные площадки	Отдых взрослых	
				1	2	3	4	5	6	7				
Авиастроителей	1932	Дзержинский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**11**
Золотая Нива	1980	Дзержинский	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**9**
Тихий центр	1893	Железнодорожный	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**11**
Челюскинский	1970	Железнодорожный	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**11**
Ботанический	1960	Заельцовский	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**9**
Аэропорт	1983	Заельцовский	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**6**
Кропоткинский	1990	Заельцовский	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**8**
Снегири	1978	Калининский	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**10**
Родники	1990	Калининский	✓	✓	✓	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	**8**
Затулинский	1960	Кировский	✓	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	**9**
Бугринская роща	1970	Кировский	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**9**
Сад Кирова	1930	Ленинский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**9**
Юго-Западный	1981	Ленинский	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**10**
Восход	1950	Октябрьский	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**11**
Никитинский	1970	Октябрьский	✓	✓	✓	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	**8**
КСМ	1960	Первомайский	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**9**
Обь ГЭС	1950	Советский	✓	✓	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	**9**
Фрунзенский	1973	Центральный	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	**10**

Обозначения: 1 – школа; 2 – детский сад; 3 – объекты рекреации; 4 – поликлиника; 5 – ТПУ; 6 – торговые объекты; 7 – объекты культуры и спорта.

Критерии комфортного проживания в микрорайонах г. Новосибирска с учетом качества благоустройства

В рамках исследования были определены критерии, являющиеся основополагающими для комфортного проживания в микрорайонах г. Новосибирска с точки зрения благоустройства территории. Такими критериями стали: *наличие, качество и покрытия* (табл. 4).

Таблица 4

Распределение баллов благоустройства придомовой территории

Table 4

Distribution of points outdoor space

Наличие		
1	Наличие стандартного набора МАФ (скамьи, урны, детские и спортивные площадки)	1
2	Использование расширенного набора МАФ и современного оборудования	1
Качество		
1	МАФ безопасны	1
2	МАФ современны	1
Покрытия		
1	Рыхлые и капитальные покрытия	1
2	Современные покрытия (резиновые)	2
	Итого*	6

*При выборе покрытия баллы не суммируются, приоритет баллов отдается лучшему покрытию.

Под критерием «наличие» подразумевается наличие базового набора малых архитектурных форм (МАФ), а именно: скамьи, урны, детские и спортивные площадки. Если стандартный набор МАФ присутствует, микрорайону присваивается 1 балл, отсутствует – 0 баллов. Также учитывалось использование расширенного набора МАФ и современного оборудования придомовых территорий микрорайона. За наличие расширенного набора присуждался еще 1 балл.

Критерий «качество» делится на два подпункта: безопасность и современность. За соблюдение каждого из подпунктов микрорайону начислялось по 1 баллу в зачет общего комфорта среды проживания.

Последним критерием являются «покрытия» детских игровых площадок. При отсутствии какого-либо покрытия, а именно рыхлого, капитального или современного резинового, микрорайону присуждалось 0 баллов. К рыхлым покрытиям относились песок, кора или щепа, к современным – имитация газона, каучуковые модульные и бесшовные резиновые покрытия. При выборе покрытия, в отличие от остальных критериев, баллы не суммировались, приоритет отдавался более современному покрытию.

Результаты отбора микрорайонов г. Новосибирска по качеству благоустройства приведены в сводной табл. 5.

Таблица 5

Сводная таблица микрорайонов г. Новосибирска по качеству благоустройства

Table 5

Quality of improvement of residential districts in Novosibirsk

Микрорайоны	Дата основания	Район в Новосибирске	Баллы*
			Н/К/П
Авиастроителей	1932	Дзержинский	0/1/0
Золотая Нива	1980	Дзержинский	2/2/1
Тихий центр	1893	Железнодорожный	2/2/0
Ботанический	1960	Заельцовский	1/1/0
Аэропорт	1983	Заельцовский	0/0/0
Кропоткинский	1990	Заельцовский	1/2/0
Снегири	1978	Калининский	2/2/1
Родники	1990	Калининский	2/2/1
Затулинский	1960	Кировский	2/1/1
Бугринская роща	1970	Кировский	1/1/1
Сад Кирова	1930	Ленинский	1/0/0
Юго-Западный	1981	Ленинский	2/1/1
Восход	1950	Октябрьский	1/0/1
Никитинский	1970	Октябрьский	1/1/1
КСМ	1960	Первомайский	1/1/1
Обь ГЭС	1950	Советский	1/2/0
Фрунзенский	1973	Центральный	1/2/0

*Н – наличие; К – качество; П – покрытия.

В Калининском районе сразу два микрорайона Снегири и Родники набрали наибольшее количество баллов по качеству благоустройства. Микрорайон Золотая Нива в Дзержинском районе также получил высокую оценку по благоустройству придомовой территории.

Критерии комфортного проживания в микрорайонах г. Новосибирска с учетом процента озеленения микрорайона от общей площади

Важную роль при создании комфортной среды играет качественное и репрезентативное озеленение. В исследовании проводилась оценка процента озеленения территории микрорайона по отношению к общей площади. В случае соответствия норме, равной 10–20 %, микрорайону присуждалось 2 балла. При отклонении от нормы в меньшую сторону – 1 балл, в большую – 3 балла. В случае полного отсутствия какого-либо озеленения – 0 баллов (табл. 6).

Таблица 6

Распределение баллов за озеленение территории микрорайона

Table 6

Territory landscaping in the district

№	Характеристика		Балл
	Наименование	Процент	
1	% озеленения от общей площади микрорайона	≤ 10	1
		10–20	2
		≥ 20	3

В результате анализа было выявлено, что только один микрорайон имеет негативное отклонение от нормы – Фрунзенский в Центральном районе г. Новосибирска. Распределение баллов по микрорайонам приведено в сводной табл. 7.

Таблица 7

Сводная таблица по качеству озеленения территории микрорайонов г. Новосибирска

Table 7

Landscaping quality in Novosibirsk districts

Микрорайоны	Дата основания	Район в Новосибирске	Баллы
Авиастроителей	1932	Дзержинский	2
Золотая Нива	1980	Дзержинский	2
Тихий центр	1893	Железнодорожный	2
Ботанический	1960	Заельцовский	2
Аэропорт	1983	Заельцовский	3
Кропоткинский	1990	Заельцовский	2
Снегири	1978	Калининский	3
Родники	1990	Калининский	2
Затулинский	1960	Кировский	3
Бугринская роща	1970	Кировский	2
Сад Кирова	1930	Ленинский	3
Юго-Западный	1981	Ленинский	3
Восход	1950	Октябрьский	3
Никитинский	1970	Октябрьский	2
КСМ	1960	Первомайский	3
Обь ГЭС	1950	Советский	3
Фрунзенский	1973	Центральный	1

Итоги комплексного анализа территорий микрорайонов по параметрам комфорта (наличие объектов социального и культурно-бытового обслуживания, соответствие нормам доступности объектов социального и культурно-бытового обслуживания, качества благоустройства и процента озеленения микрорайона от общей площади) и баллы, полученные в ходе оценки, были занесены в таблицу и ранжированы от наиболее комфортных к наименее комфортным (табл. 8).

Таблица 8

Итоговая таблица комфортных микрорайонов г. Новосибирска, ранжированных по степени общего комфорта территории

Table 8

Comfortable districts ranked by the general comfort of the territory

№	Микрорайоны	Параметры комфорта				Итого
		наличия объектов социального и культурно-бытового обслуживания	по норм. доступности объектов соц. и культурно-бытового обслуживания	с учетом качества благоустройства микрорайона	с учетом процента озеленения микрорайона от общей площади	
1	Снегири	6	10	5	3	24
2	Тихий центр	6	11	4	2	23
3	Юго-Западный	6	10	4	3	23
4	Восход	6	11	2	3	22
5	Затулинский	6	9	4	3	22
6	Золотая Нива	6	9	5	2	22
7	Родники	6	8	5	2	21
8	КСМ	6	9	3	3	21
9	Обь ГЭС	6	9	3	3	21
10	Авиастроителей	6	11	1	2	20
11	Бугринская роща	6	9	3	2	20
12	Фрунзенский	6	10	3	1	20
13	Ботанический	6	9	2	2	19
14	Кропоткинский	6	8	3	2	19
15	Никитинский	6	8	3	2	19
16	Сад Кирова	6	9	1	3	19
17	Аэропорт	6	6	0	3	15

Также комфортные и наименее комфортные микрорайоны отмечены на карте г. Новосибирска (рис. 2).

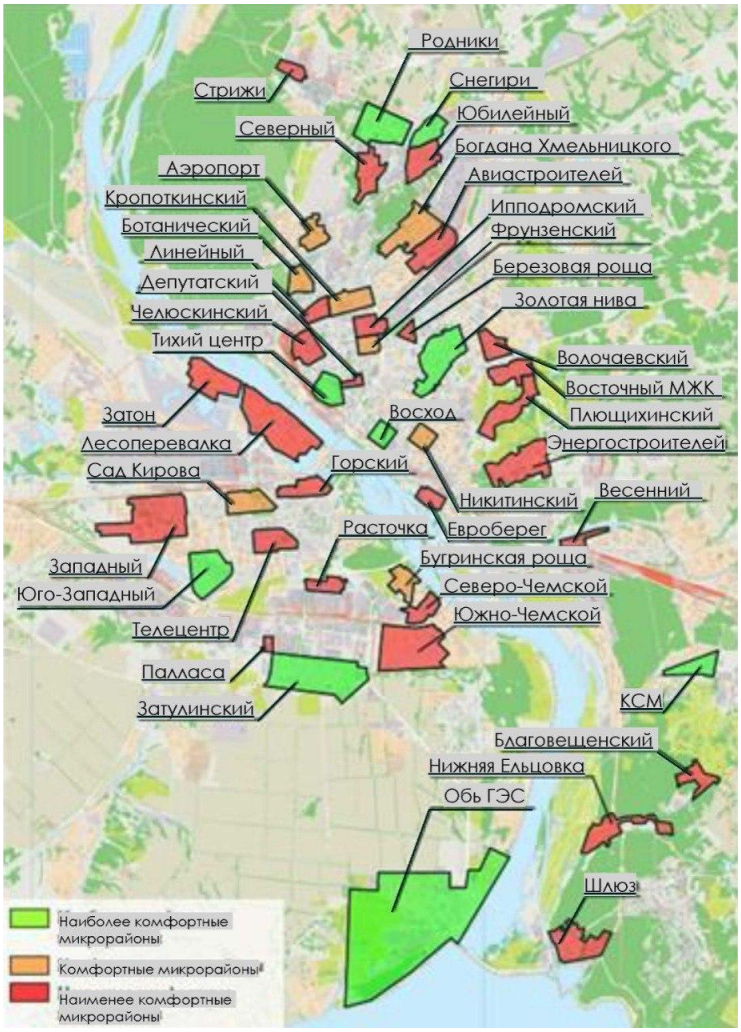


Рис. 2. Расположение наиболее комфортных, комфортных и наименее комфортных микрорайонов на карте Новосибирска[2]
Fig. 2. Location of the most and less comfortable districts in Novosibirsk

Заключение

В результате исследования были выделены критерии, в соответствии с которыми определены наиболее комфортные микрорайоны г. Новосибирска (см. табл. 8). Установлено, что такие микрорайоны расположены в следующих административных районах города: Калининском (Снегири и Родники), Железнодорожном (Тихий центр), Ленинском (Юго-Западный и Сад Кирова), Октябрьском (Восход и Никитинский), Кировском (Затулинский и Бугринская роща), Дзержинском (Золотая Нива и Авиастроителей), Первомайском (КМС), Советском (ОбьГЭС), Центральном (Фрунзенский) и Заельцовском (Ботанический,

[2] URL: https://fedoroff.net/load/maps/karta/karta_novosibirska/90-1-0-1553

Кропоткинский и Аэропорт). Большинство комфортных для проживания микрорайонов относятся к периоду застройки 1893–1981 гг. Наиболее значительные отклонения от нормативных показателей зафиксированы по критериям доступности объектов рекреации и медицинских учреждений (поликлиник).

Список источников

1. *Гашенко А.Е.* Формирование микрорайонных образований Новосибирска в 1950–2010-е гг. // Архитектон: известия вузов. 2015. № 2 (50). URL: http://archvuz.ru/2015_2/13
2. *Журин Н.П.* Градостроительство в Сибири второй половины XIX – начала XX в. Новосибирск : НГАХА, 2000. 107 с.
3. *Баландин С.Н.* Новосибирск. История градостроительства 1893–1945 гг. Новосибирск : Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1978. 135 с.
4. *Спиридонов В.Ю.* Принципы территориального планирования систем расселения // Академический вестник Уралниипроект РААСН. 2009. С. 31–38.
5. *Графова Е.С.* Благоустройство территории университета как комплексная организация гармоничной, функциональной и доступной предметно-пространственной среды // Молодежь в науке и творчестве : материалы Международного научного форума обучающихся. Гжель : ГГУ, 2017. С.119–120. EDN: XXASUX
6. *Бычкова А.Н., Ганжа С.Д.* Типы жилой застройки города Новосибирска // Современные тенденции развития науки и технологий. 2017. № 3-2. С. 98–102. EDN: YKRIEL
7. *Протасова Ю.А., Рачкевич Т.Е.* Проектирование жилой среды: микрорайон или квартал // Региональные архитектурно-художественные школы. 2017. № 1. С. 23–28. EDN: YXEDMW
8. *Спиридонов В.Ю.* Градостроительная информационная платформа: прогрессивные методы планирования и управления устойчивым развитием территорий // Архитектон: известия вузов. 2022. № 4 (80). URL: http://archvuz.ru/2022_4/21/ DOI: 10.47055/1990-4126-2022-4(80)-21
9. *Вершинина С.Э., Бочкарев Д.А.* «Советские» принципы планировки на примере микрорайона Солнечный г. Иркутска и их применение в контексте современной градостроительной практики для формирования комфортной среды п-ва Чертугеевский // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 2. С. 101–108.
10. *Кречетов П.Н.* Градостроительный анализ территории многофункционального культурного центра в Кольцово // Ноэма. Архитектура. Урбанистика. Искусство. 2021. № 1. С. 108–118.
11. *Градостроительный анализ* существующей планировочной структуры города // Архитектура Новосибирска. URL: https://nsk.novosibdom.ru/node/2864 (дата обращения: 15.12.2024).

References

1. *Gashenko A.E.* District Formation in Novosibirsk in the 1950s–2010s. *Architecton: izvestiya vuzov*. 2015; 50 (2). Available: http://archvuz.ru/2015_2/13 (In Russian)
2. *Zhurin N.P.* Urban Planning in Siberia in the 19th and Early 20th Centuries. Novosibirsk, 2000. 107 p. (In Russian)
3. *Balandin S.N.* Novosibirsk. The History of Urban Planning in 1893–1945. Novosibirsk, 1978. 135 p. (In Russian)
4. *Spiridonov V.Yu.* Principles of Spatial Planning. *Akademicheskii vestnik Uralniiproekt RAASN*. 2009. Pp. 31–38. (In Russian)
5. *Grafova E.S.* Landscaping of University Territory as Comprehensive Organization of Harmonious, Functional and Accessible Subject-Spatial Environment. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'The Youth in Science and Creativity*'. Gzhel, 2018. 821 p. EDN: XXASUX (In Russian)
6. *Bychkova A.N., Ganzha S.D.* Types of Residential Development in Novosibirsk. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*. 2017; (3-2): 98–102. EDN: YKRIEL (In Russian)
7. *Protasova Yu.A., Rachkevich T.E.* Design of Residential Environment: District or Quarter. *Regional'nye arkhitekturno-khudozhestvennye shkoly*. 2017; (1): 23–28. EDN: YXEDMW (In Russian)

8. *Spiridonov V.Yu.* Urban Planning Information Platform: Progressive Methods of Planning and Management of Sustainable Development of Territories. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2022; 4 (80). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-4(80)-21 (In Russian)
9. *Vershinina S.E., Bochkarev D.A.* "Soviet" Principles of Planning on the Example of Solnechny district of Irkutsk and their Application in Modern Urban Planning Practice for Comfortable Environment in Chertugeevsky. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2017; 7 (2): 101–108. (In Russian)
10. *Krechetov P.N.* Urban Planning Analysis of Multifunctional Cultural Center in Koltsovo. *Noema. Arkhitektura. Urbanistika. Iskusstvo*. 2021; (1): 108–118. (In Russian)
11. Urban planning analysis of the existing planning structure of the city. Available: https://nsk.novosibdom.ru/node/2864 (accessed December 15, 2024)/ (In Russian)

Сведения об авторах

Бызова Валерия Сергеевна, магистрант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, v.byzova@sibstrin.ru

Смолина Олеся Олеговна, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, zelenoest-vo@mail.ru

Authors Details

Valeria S. Byzova, Undergraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, v.byzova@sibstrin.ru

Olesya O. Smolina, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, zelenoest-vo@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 03.06.2024
Одобрена после рецензирования 05.12.2024
Принята к публикации 09.12.2024

Submitted for publication 03.06.2024
Approved after review 05.12.2024
Accepted for publication 09.12.2024

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 70–81.

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 (1): 70–81.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 722.03
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-70-81 EDN: DYDMPF

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПОРТОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПРИМЕРЕ НЬЮ-ЙОРКА

Марк Александрович Фомин, Милена Владимировна Золотарева
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Строительство промышленных предприятий в XIX – первой половине XX в., их тяготение к водным ресурсам стали в настоящее время результатом существования зон неиспользованной складской и причальной инфраструктуры на прибрежных территориях. Сегодня эти территории имеют деградирующие характеристики. С другой стороны, участки бывших промышленных предприятий являются неотъемлемой частью исторических городов, определяющей их идентичность. В связи с этим во многих городах с многовековой историей эта тема является исключительно актуальной. Для изучения опыта перепрофилирования складской и портовой инфраструктуры были выбраны прибрежные территории Нью-Йорка.

Целью настоящего исследования является изучение мирового опыта перепрофилирования складских и причальных объектов на примере Нью-Йорка.

В связи с актуальностью рассматриваемой проблемы и в контексте заявленной темы были определены направления исследования. Так, в круг *задач* вошли: выявление предпосылок формирования портовой и складской инфраструктуры в Нью-Йорке; определение современной проблематики этих участков исторической среды; оценка потенциала территорий к развитию; выявление наиболее удачных примеров перепрофилирования портовой инфраструктуры для современного использования.

Метод исследования представляет собой комплексный подход, включающий: изучение вопросов перепрофилирования портовой инфраструктуры; исследование промышленных объектов, расположенных на прибрежных территориях (на примере Нью-Йорка); проведение многоаспектного анализа реализованных проектных решений преобразования портовой инфраструктуры; рассмотрение функционально-планировочных особенностей объекта исследований.

Выводы. В ходе исследования выявлено, что подобные территории обладают значительными перспективами для развития города, а их преобразование способствует созданию новых рабочих мест и увеличению доходов бюджета исторических городов. Итогом исследования является формулировка методов, применяемых в процессе перепрофилирования объектов портовой инфраструктуры, которые могут быть применены в процессе аналогичных работ в других исторических городах со схожими проблемами.

Ключевые слова: градостроительство, социально ориентированная среда, промышленные территории, транспортная инфраструктура, ландшафтная регенерация

Для цитирования: Фомин М.А., Золотарева М.В. Преобразование объектов портовой инфраструктуры на примере Нью-Йорка // Вестник Томского государ-

© Фомин М.А., Золотарева М.В., 2025

ственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 70–81. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-70-81. EDN: DYDMPF

ORIGINAL ARTICLE

PORT INFRASTRUCTURE CONVERSION IN NEW YORK CITY AS AN EXAMPLE

Mark A. Fomin, Milena V. Zolotareva
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The paper considers examples of port facility conversion in New York. In many historical cities, this problem is extremely relevant. The construction of industrial enterprises in the 19th and early 20th centuries, their attraction to water resources, result from unused storage zones and port infrastructure in coastal areas. These territories have currently degrading characteristics. On the other hand, former industrial enterprises are an integral part of historical cities.

Purpose: The study of the experience of converting the port infrastructure in New York.

Methodology: Integrated approach, including studying the issues of port infrastructure conversion; industrial facilities locating on coastal territories; multidimensional analysis of implemented design solutions for port infrastructure transformation; functional and planning of port infrastructure.

Research findings: Identification of prerequisites for the formation of port and warehouse infrastructure in New York; current problems of historical environment areas; the territory potential for transformation; examples of port infrastructure conversion for modern use. These territories have significant prospects for the city development, and their profiling contributes to the creation of new jobs and an increase in the budget of historical cities. The article formulates the conversion principles of such objects, which can be applied to other historical cities.

Keywords: facility conversion, urban planning, socially oriented environment, industrial areas, transport infrastructure, landscape reclamation

For citation: Fomin M.A., Zolotareva M.V. Port Infrastructure Conversion in New York City as an Example. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 70–81. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-70-81. EDN: DYDMPF

Введение

Деятельность, направленная на сохранение историко-культурного наследия, включение его в активную жизнь города и создание на его основе привлекательных образов городской среды, непосредственно связана с вопросами перепрофилирования исторических объектов, утративших свою функциональную нагрузку.

Проблемы перепрофилирования промышленных, складских и производственных территорий в городах в настоящее время обозначены достаточно остро. Так называемые «серые пояса» исторических городов делят их территории на центр и периферию, ограничивая интеграцию. Традиционно бывшие промышленные предприятия размещались вблизи береговой линии, формируя инфраструктуру пристаней и причалов. Эти объекты занимали наиболее привлекательные участки городской среды. Поэтому решение вопросов перепрофилирования подобных зон весьма актуально. Не исключением является

и Санкт-Петербург. Город закладывался на берегах Балтики, в том числе как порт, а строительство военных судов первоначально размещалось в его центре. Первые торговые корабли пришли в северную столицу еще при Петре I. Торговая функция укоренялась и развивалась на протяжении всей истории Санкт-Петербурга. Портальные краны стали неизменным элементом архитектурного облика западной части города. В XIX в. портовая зона пополнилась промышленными предприятиями, тяготеющими к воде. Это обусловило актуальность задачи формирования территорий устойчивого развития на основе «серого пояса» Санкт-Петербурга и его прибрежных территорий.

Подобные вопросы являются неотъемлемой частью развития крупных городов. В настоящее время существует значительное число успешных примеров реализации проектов и практических решений в этой области. Например, в Москве поставлена цель придать речным фасадам облик, соответствующий статусу столичного города, и создать единый рекреационный маршрут вдоль речных магистралей. На сегодняшний день уже 33 % набережных, в прошлом занятых промышленными объектами, благоустроены, для других разработаны перспективные проекты развития [1]. К числу успешных примеров перепрофилирования промышленных объектов на прибрежных территориях относится проект реорганизации промзоны «Южный порт» в Москве. В рамках этого проекта не только построены объекты недвижимости, но и планируется создание общественных пространств, расположенных непосредственно на берегу, а также в водной акватории [2]. Подобные проекты реализуются в Екатеринбурге, Якутске и других городах. В России запланировано реализовать около 200 проектов благоустройства набережных в 2025 г. [3].

За рубежом решение проблем создания устойчивой и комфортной среды прибрежных территорий началось с 1980-х гг. Перепрофилирование Лондонских доков Доклэндс стало одним из первых масштабных проектов в этом направлении. Территория, занимаемая доками, расположена к востоку и юго-востоку от центра британской столицы. Работы, начавшиеся еще в 80-е гг. XX в., продолжаются до сих пор. На месте бывшей портовой зоны появились жилые и коммерческие объекты, здания культурного назначения и общественные пространства. Другим успешным примером является программа реконструкции береговой зоны Роттердама (Коп ван Зюд), реализация которой началась с 1990-х гг. Сочетание исторических зданий с новыми объектами, выполненными в современной и яркой манере, создало привлекательную среду на этой в прошлом промышленной территории [4]. Еще одним успешным примером перепрофилирования служит реконструкция территории в Мельбурне (Австралия). Площадь порядка 200 га, прилегающая к воде, преобразуется в район с открытыми общественными пространствами и высокотехнологичной инфраструктурой [5].

Целью настоящего исследования является изучение зарубежного опыта работы с бывшими территориями портовой инфраструктуры. Анализ международного опыта важен для развития отечественной научной мысли и практической деятельности, что определило выбор темы исследования, посвященной программе преобразования промышленных предприятий и территорий портовой и складской инфраструктуры Нью-Йорка. В соответствии с актуальностью темы и цели исследования были сформулированы следующие задачи:

– рассмотреть предпосылки формирования портовой и складской инфраструктуры на примере подобных территорий Нью-Йорка;

– выявить современную проблематику этих участков исторической среды, их потенциал и возможность преобразования;

– на основе наиболее успешных примеров рассмотреть принципы и методы перепрофилирования портовой инфраструктуры для современного использования.

Исследование выполнено на примере проектов перепрофилирования, реализованных в Нью-Йорке в 2022–2023 гг. Эти проекты демонстрируют актуальные тренды трансформации бывших промышленных территорий и принципы реконструкции портовой инфраструктуры для создания комфортной среды, что может оказаться полезным для аналогичных участков.

Методика и изученность проблемы

Работа выполнена на основе приоритетного направления, ориентированного на создание устойчивой и комфортной среды развития современных городов. Методика основана на комплексном подходе, включающем анализ вопросов перепрофилирования портовой инфраструктуры и промышленных объектов, расположенных на прибрежных территориях (на примере Нью-Йорка), многоаспектный анализ реализованных проектных решений, а также изучение функционально-планировочных особенностей объекта исследований.

Проблема перепрофилирования бывших производственных и складских объектов, расположенных в прибрежной зоне, является приоритетным направлением изучения и вызывает научный интерес среди специалистов и широкого круга общественности. Этот вопрос находит отражение не только в научных публикациях, но и на страницах периодических изданий. Среди ученых, рассматривающих вопросы преобразования портовой инфраструктуры, следует отметить таких специалистов, как В.П. Белобородов, Л.И. Дробышевская, И.Л. Колтун и др.; проблематику архитектурно-планировочной и территориальной организации прибрежных территорий исследовали М.А. Гранстрем, Ю.В. Андреева, А.В. Бергман, А.В. Воронина, С.В. Генералова, Н.В. Задворянская, Т.И. Лазарева, В.А. Нефедов, Н.Н. Титомирова и др.; организация рекреационной функции на прибрежной территории была представлена в работах следующих ученых: И.Д. Родичкина, Ю.Н. Лобанова, В.П. Стаускаса и др.; социальные аспекты в решении задач на градостроительном уровне рассматривали в своих работах К. Линч, Л.Б. Коган, З.Н. Яргина, К. Дэй и др.

История и проблематика

История застройки береговой линии складскими сооружениями и причалами в Нью-Йорке берет свое начало со времен первых поселенцев, осознавших важность развития портового комплекса для экономики города (рис. 1). Благоприятное географическое положение Нью-Йоркского порта на Атлантическом побережье США способствовало этому процессу. В течение многих десятилетий состояние данной территории претерпевало многочисленные изменения под влиянием растущего объема торговли и увеличивающихся потребностей судоходства. Это приводило к перестройке существовавших объектов, которые

должны были соответствовать требованиям современных торговых операций и технологических трендов [6]. В результате сложилась ситуация охвата полукольцом Манхэттена причальными и складскими территориями (рис. 2).

Рис. 1. Нью-Йорк, 1856 г.[1]
Fig. 1. New York, 1856

Рис. 2. Нью-Йорк, Манхэттен, 1890 г.[2]
Fig. 2. New York, Manhattan, 1890

[1] URL: https://ru.pinterest.com/pin/751186412816211913/
[2] URL: https://vk.com/wall-200742310_57

Один из самых значимых периодов истории портовой инфраструктуры в Нью-Йорке приходится на вторую половину XX в., когда город стал ведущим международным торговым центром. На этом этапе были построены новые терминалы, оснащенные автоматизированными системами разгрузки товаров, предназначенные для обслуживания современных контейнерных судов. Некоторые из существующих объектов, размещенных в прибрежной зоне Манхэттена, такие как причалы, складские помещения или здания административного назначения, престали соответствовать требованиям эксплуатации. Таким образом, сложилась ситуация, когда портовая инфраструктура прошлого уже не соответствовала современным запросам [7]. К концу XX в. многие из старых причалов стали невостребованными, хотя продолжали занимать значительные территории прибрежной зоны. Все это потребовало решения вопроса определения их дальнейшего предназначения [8].

Сохранившаяся портовая инфраструктура Манхэттена является ценной историко-культурной средой города, подчеркивающей его идентичность. Это обстоятельство обусловило необходимость сохранения данных объектов и обеспечения их востребованности в новых социально-экономических условиях. В связи с этим внимание специалистов было уделено методу преобразования территорий и объектов. Этот метод позволяет сохранить объемно-пространственные характеристики сооружений при изменении их функционального назначения и новой организации средового сценария. Таким образом, с учетом потенциала портовой зоны были продуманы решения, способствующие повышению капитализации территории и объектов, эффективности использования, инвестиционной привлекательности.

Подходы к преобразованию портовой инфраструктуры

Перепрофилирование объектов портовой инфраструктуры вначале представлялось сложной задачей. Это обусловлено рядом факторов, включая правовые ограничения и финансирование. Однако процесс преобразования старых портовых зон стал важной стратегической задачей для реализации градостроительных программ муниципалитета Нью-Йорка [9]. Эти работы были направлены не только на решение вопросов устранения депрессивных территорий в центре города, но и на функциональное насыщение прибрежной территории. В результате некоторые объекты обрели торговые или развлекательные функции, в то время как другие были переориентированы в прогулочные и спортивные зоны. Старые причалы превращались в туристические центры, пространство для выставок и культурных мероприятий. Кроме этого, при проведении реконструкции в зоне бывших портов учитывались такие аспекты, как доступность, интеграция в городскую среду, мнение и потребности местных жителей.

Одной из значимых задач преобразования порта стала экологизация территорий. Например, на участках старых доков и прилегающих к ним территориях создавались «зеленые» зоны, организовывались парки, что способствовало улучшению экологической обстановки города и созданию комфортной среды [10] (рис. 3).

Эти меры позволили сохранить историческую ценность старых объектов и возродить их для активного использования, что имеет большое значение для сохранения культурного наследия (памяти) города и его жителей.

Рис. 3. Набережная Ист-Ривер в Нью-Йорке, 2023 г.[3]
Fig. 3. The East River embankment in New York, 2023

В процесс перепрофилирования объектов портовой инфраструктуры были вовлечены не только бизнес-структуры, но и муниципальные власти, видевшие в этом потенциал для улучшения экономического климата и повышения качества жизни населения. Это позволило привлечь новые компании и инвестиции, сделав эту часть города более привлекательной и комфортной для местных жителей и туристов.

Рассмотрим примеры проведения реконструктивных мероприятий территорий и объектов портовой инфраструктуры.

Одним из примеров успешного перепрофилирования объектов в Нью-Йорке стал район Дамба (Down Under the Manhattan Bridge Overpass) (рис. 4). Изначально эта территория использовалась как складская зона, однако благодаря продуманному градостроительному и инвестиционному подходу район был трансформирован в привлекательное место для отдыха и прогулок жителей и туристов. Здесь разместились современные офисные здания, занятые технологическими компаниями, рестораны, художественные галереи. Этот проект способствовал привлечению инновационных компаний и стартапов, что привело к созданию новых рабочих мест и увеличению доходов городского бюджета. Таким образом, проект оказал положительное влияние на развитие территории бывшей портовой инфраструктуры. Были предложены решения не только для зданий, расположенных на этом участке, внимание было уделено и благоустройству прилегающих территорий. Была организована прогулочная набережная с «зелеными» зонами [11] (рис. 5).

Еще одним примером успешного преобразования является район Бруклин Наварро (рис. 6). Ранее здесь находились неиспользуемые железнодорожные пути, но после проведенной реконструкции они были преобразованы в центральную пешеходную зону. Сегодня Бруклин Наварро стал популярным

[3] URL: https://dzen.ru/a/Yriqz8QodV_My-lz

местом для пеших и велосипедных прогулок и проведения различных культурных мероприятий (рис. 7). Эта территория привлекает не только местных жителей, но и туристов, увеличивая поток посетителей, что способствует развитию местного туристического сектора [12]. Ключевым фактором успеха этих проектов стало сотрудничество между государственными органами, инвесторами, а также учет современных требований и трендов.

Рис. 4. Бруклинский мост в Нью-Йорке, XIX в.[4]
Fig. 4. Brooklyn Bridge in New York in the 19th century

Рис. 5. Бруклинский мост в Нью-Йорке, XXI в[5].
Fig. 5. Brooklyn Bridge in New York in the 21st century

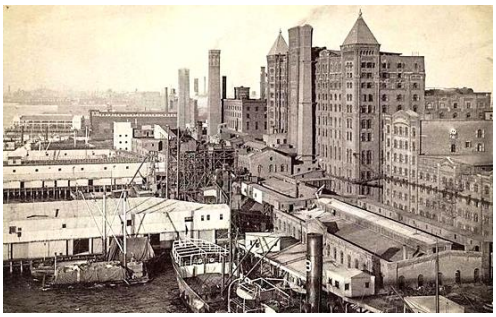


Рис. 6. Завод Domino, Нью-Йорк, 1870 г.[6]
Fig. 6. Domino Factory, New York, 1870

Рис. 7. Domino Park, Нью-Йорк, 2023 г.[7]
Fig. 7. Domino Park, New York, 2023

Проведенные мероприятия на этих двух территориях демонстрируют, что подобные проекты обеспечивают не только экономический эффект, но и улучшают качество жизни горожан, усиливают привлекательность города

[4] URL: https://wallhere.com/ru/wallpaper/715459
[5] URL: https://laminarts.ru/brooklyn/park/
[6] URL: https://dzen.ru/a/XGm9obvcPACveKx8
[7] URL: https://zelengarden.ru/15-foto/domino-park-plan.html

для туристов. Разработка и реализация подобных проектов является важным шагом в развитии города и создании благоприятной среды [13].

Рассмотренные примеры преобразования исторических портовых территорий позволили сформулировать основные принципы и методы реализации реконструктивных работ:

– Принцип приоритетного использования градостроительных возможностей территории [14]. На основе указанного принципа формируется метод реконструктивных мероприятий, устанавливающий взаимосвязь многофункциональных коммуникационных систем. Метод характеризуется восстановлением и формированием новых функционально-планировочных, ландшафтно-композиционных и природно-экологических связей территорий с открытыми водными пространствами.

– Принцип организации социально ориентированной среды. Предполагает проведение реконструкции с учетом адаптации новых функций под общественные интересы, с учетом потребностей населения и комфорта туристического использования [15]. Метод организации среды, в соответствии этим принципом, основывается на формировании градостроительной дискретности, системе пространственной структуризации. Территория должна быть привлекательна, доступна, безопасна и удобна в использовании для всех категорий населения.

– Принцип экологической направленности реконструкции заключается в восстановлении экологического равновесия на урбанизированных территориях [16]. В соответствии с данным методом проводится регенерация природы и «зеленое» структурирование пространств.

– Принцип сохранения «памяти места» выражается в выборе приемов организации территории, направленной на выявление ее уникальности. Принцип реализуется методом территориальной аутентичности. Целью является повышение ценности территории в процессе создания отличительного, присущего только этой территории образа (территориального брэндинга). При работе в исторической среде эта цель достигается выявлением исторического контекста территории.

– Принцип экономической целесообразности и эффективности заключается в участии органов власти, привлечении инвесторов и горожан в процесс реализации проекта [17]. Этот принцип воплощается через метод поэтапного развития территории и метод диверсификации функционального наполнения. Поэтапная реализация масштабного проекта является принятой практикой девелопмента, что в свою очередь непосредственно связано с бизнес-стратегиями, работающими на диверсификацию функционального наполнения реконструируемой территории.

Изучение объектов и опыта работ в прибрежных зонах, занятых объектами промышленной инфраструктуры, является важным фактором при выборе подходов и путей решения подобных проблем в будущем на других участках городской среды.

Заключение

Основой формирования развитой портовой зоны в Нью-Йорке является его выгодное географическое положение на Атлантическом побережье. В по-

следние годы, вследствие изменений в структуре мирового торгового рынка, многие ранее построенные портовые объекты в Нью-Йорке утратили свою актуальность и эффективность. Однако эти объекты имеют огромный потенциал и могут стать новыми символами и привлекательными узлами в городской структуре.

В процессе анализа мероприятий по преобразованию портовой инфраструктуры были выявлены основные принципы их реализации: принцип приоритетного использования градостроительных возможностей территории; принцип организации социально ориентированной среды; принцип экологической направленности реконструкции; принцип сохранения «памяти места»; принцип экономической целесообразности и эффективности.

На основе анализа удачных примеров перепрофилирования портовой инфраструктуры было рассмотрено применение принципов их реконструкции, определены соответствующие методы действий:

– метод многофункциональных коммуникационных систем;
– метод градостроительной дискретности;
– метод регенерации природы и «зеленого» структурирования;
– метод территориальной аутентичности;
– метод поэтапного развития и метод диверсификации функционального наполнения.

Оптимальное использование портовых объектов для создания инновационных центров и культурных кварталов может оказаться ключевым фактором в развитии городов и регионов со схожими предпосылками и условиями развития. Опираясь на примеры Нью-Йорка, другие города и государства смогут разрабатывать собственные стратегии для привлечения инвестиций, развития бизнеса и создания новых рабочих мест.

Список источников

1. *Булгакова Н.* Большая вода промышленных зон: масштабная трансформация пространств у реки // Градостроительный комплекс Москвы : [сайт]. URL: https://stroi.mos.ru/articles/bol-shaia-voda-promyshliennykh-zon-masshtabnaia-transformatsiia-prostranstv-u-rieki (дата обращения: 23.03.2023).
2. *Смирнова И.* Эксперт рассказала о значимости реорганизации прибрежных территорий // METRO : [сайт]. URL: https://www.gazetametro.ru/articles/ekspert-rasskazala-o-znachimosti-reorganizatsii-pribrezhnyh-territorij-25-09-2024 (дата обращения: 23.03.2023).
3. *В России намечено реализовать* почти 200 проектов благоустройства набережных в 2023 г. // Интерфакс : [сайт]. URL: https://www.interfax-russia.ru/main/v-rossii-namecheno-realizovat-pochti-200-proektov-blagoustroystva-naberezhnyh-v-2023-godu (дата обращения: 23.03.2023).
4. *Бергман А.В.* Некоторые аспекты анализа мирового опыта создания линейных парков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 3. С. 594–605. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-3-594-605
5. *Перепрофилирование портовых доков* // Деловой Петербург. URL: https://www.dp.ru/a/2008/06/06/Pereprofilirovanie_portov (дата обращения: 23.03.2023).
6. *Brooklyn Waterfront History* : [официальный сайт]. URL: https://www.bkwaterfront-history.org/ (дата обращения: 23.03.2023).
7. *Wayback Machine* : [официальный сайт]. URL: https://web.archive.org/ (дата обращения: 23.03.2023).
8. *Варламов И.А.* Новая набережная в Нью-Йорке: хотели бы такую в свой город. 4 июля 2019. URL: https://varlamov.ru/3504918.html (дата обращения: 23.03.2023).

9. *Иконников А.В.* Нью-Йорк. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1980. 96 с.
10. *Lopate Ph*. Seaport // The New York Times. April 25, 2004. URL: https://www.nytimes.com/2004/04/25/books/chapters/seaport.html?smid=url-share (дата обращения: 31.01.2025).
11. *Губанова М.А., Иванченко Л.А.* Состояние, проблемы и перспективы развития портовой инфраструктуры // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. № 4 (14). С. 171–173. EDN: YWPIKT
12. *Сугробов М.Д.* Современное состояние, проблемы и перспективы развития инфраструктуры портовых комплексов водного транспорта // Human Progress. 2024. № 1. С. 5. URL: http://progress-human.com/images/2024/Tom10_1/Sygrobov.pdf. DOI 10.34709/IM.1101.5. EDN: CVMGIT
13. *Нефедов В.А.* Городской ландшафтный дизайн. Санкт-Петербург : Любавич, 2012. 320 с. ISBN 9785869833556.
14. *Белобородов В.П.* Проблемы функционирования и развития портовой инфраструктуры // Экономика транспортного комплекса. 2009. № 3. С. 61–64.
15. *Дробышевская Л.Н., Лактионова Т.В.* Повышение результативности инвестиционного процесса в туристско-рекреационном секторе Краснодарского края // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 11-2 (81). С. 86–90. ISSN: 2411-0450 eISSN: 2413-0257.
16. *Журбей Е.В., Давыборец Е.Н., Еленева Е.В.* Редевелопмент как перспективный механизм развития муниципальных территорий: зарубежный и отечественный опыт // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2014. № 4. С. 90–118. EDN: TFPGOF
17. *Хомбергер Э.* Нью-Йорк. История города New York City: A Cultural and Literary Companion. Москва : Эксмо, 2008. 416 с. ISBN 978-5-699-25413-2.

REFERENCES

1. *Bulgakova N.* Big water industrial zones: Large-scale transformation of spaces near the river. Available: https://stroi.mos.ru/articles/bol-shaia-voda-promyshliennykh-zon-masshtabnaia-transformatsiia-prostranstv-u-rieki (accessed March 23, 2023). (In Russian)
2. *Smirnova I.* The expert spoke about the importance of the reorganization of coastal territories. Available: www.gazetametro.ru/articles/ekspert-rasskazala-o-znachimosti-reorganizatsii-pribrezhnyh-territorij-25-09-2024 (accessed March 23, 2023). (In Russian)
3. In Russia, it is planned to implement almost 200 embankment improvement projects in 2023. Available: www.interfax-russia.ru/main/v-rossii-namecheno-realizovat-pochti-200-proektov-blagoustroystva-naberezhnyh-v-2023-godu (accessed March 23, 2023) (In Russian)
4. *Bergman A.V.* Some Aspects of Analyzing the World Experience of Creating Linear Parks. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2019; 9 (3): 594–605. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-3-594-605 (In Russian)
5. Port dock conversion. Available: www.dp.ru/a/2008/06/06/Pereprofilirovanie_portov (accessed March 23, 2023). (In Russian)
6. Brooklyn waterfront history. Available: www.bkwaterfronthistory.org (accessed March 23, 2023).
7. Wayback Machine. New York, 2024. Available: https://web.archive.org (accessed March 23, 2023).
8. *Varlamov I.A.* New embankment in New York: We would like to have one in our city, 2019. Available: https://varlamov.ru/3504918.html (accessed March 23, 2023). (In Russian)
9. *Ikonnikov A.V.* New York. Leningrad: Stroiizdat, 1980. 96 p. (In Russian)
10. *Lopate Ph*. Seaport. The New York Times. 2004. 52 p. Available: www.nyti-mes.com/2004/04/25/books/chapters/seaport.html?smid=url-share (accessed January 31, 2025).
11. *Gubanova M.A., Ivanchenko L.A.* State, Problems and Prospects of Port Infrastructure Development. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*. 2018; 4 (14): 171–173. EDN: YWPIKT (In Russian)
12. *Sugrobov M.D.* Current State, Problems and Prospects of Water Transport Port Infrastructure Development. *Human Progress*. 2024; (1): 5. DOI: 10.34709/IM.1101.5. EDN: CVMGIT (In Russian)
13. *Nefedov V.A.* Urban Landscaping. Saint-Petersburg: Lyubavich, 2012. 320 p. ISBN 9785869833556 (In Russian)
14. *Beloborodov V.P.* Problems of Functioning and Development of Port Infrastructure. *Ekonomika transportnogo kompleksa*. 2009; (3): 61–64. (In Russian)

15. *Drobyshevskaya L.N., Laktionova T.V.* Efficiency Improvement of Investments in Tourism and Recreation of the Krasnodar Region. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2021; (11-2 (81)): 86–90. ISSN: 2411-0450 eISSN: 2413-0257. (In Russian)
16. *Zhurbei E.V., Davyborets E.N., Eleneva E.V.* Redevelopment as a Promising Mechanism of Municipal Territory Development: Russian and Foreign Experience. *Oikumena. Regionovedcheskie issledovaniya*. 2014; (4): 90–118. EDN: TFPGOF (In Russian)
17. *Homberger E.* New York City: A Cultural and Literary Companion. Moscow: Eksmo, 2008. 416 p. ISBN 978-5-699-25413-2. (Russian translation)

Сведения об авторах

Фомин Марк Александрович, магистрант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190013, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, mark-fomin-03@mail.ru

Золотарева Милена Владимировна, канд. архитектуры, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190013, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, goldmile@yandex.ru

Authors Details

Mark A. Fomin, Undergraduate Student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, mark-fomin-03@mail.ru

Milena V. Zolotareva, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, goldmile@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 28.09.2024
Одобрена после рецензирования 23.10.2024
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 28.09.2024
Approved after review 23.10.2024
Accepted for publication 31.10.2024

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 82–98.

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 (1): 82–98.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 711.163
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-82-98 EDN: EAYMUQ

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО РЕШЕНИЯ МЕМОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Елена Ивановна Гурьева, Анна Викторовна Шутка, Галина Михайловна Величко
Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются особенности формирования градостроительной концепции мемориальных комплексов. Проанализированы основные архитектурно-планировочные, композиционно-художественные, ландшафтные, конструктивные принципы формирования мемориальных ансамблей.

Актуальность. Обосновывается необходимость и актуальность сохранения памяти о войне, подвиге солдата. Приводятся ключевые принципы архитектурных, конструктивных, ландшафтных решений мемориалов, которые базируются на учете индивидуальных композиционных и ландшафтно-рекреационных особенностей градостроительных ситуаций.

Рассматривается градостроительная специфика формирования современных мемориальных комплексов, посвященных подвигу военных, участников и героев войн: Великой Отечественной, войны в Афганистане, специальной военной операции на Украине. В настоящее время меняется отношение к концептуально-смысловой парадигме памятников и мемориалов. Расположение мемориальных комплексов в городской структуре, размер и форма участка, возможность подъезда и подхода, доступность территории, эмоциональное и зрительное восприятие, взаимодействие с окружающим ландшафтом – важные аспекты формирования архитектурно-художественного образа, требующие анализа и переосмысления на современном этапе социально-экономического развития.

Цель работы – выявить основополагающие принципы построения мемориальных комплексов с учетом градостроительной структуры, природного окружения и особенностей прилегающей застройки.

В статье освещаются особенности ландшафтной организации мемориальных комплексов. Отмечается необходимость концептуального художественного подхода к проектированию ландшафтного дизайна территории. Подчеркивается важность выбора ассортимента растений. Ландшафтное решение мемориальной инфраструктуры возможно на нюансе и контрасте. Концепция включения памятника в структуру естественного ландшафта предопределяет пейзажную стилистику генплана. Концепция постановки мемориала на контрасте с окружением предусматривает применение регулярной планировочной структуры.

Мемориальные комплексы представляют собой особый вид общественной инфраструктуры городской среды. Сегодня общественные пространства рассматриваются как концептуальные полифункциональные образования, отражающие основные тенденции и изменения всех сфер жизнедеятельности городского населения. Концептуального решения требуют и градостроительные приемы, и принципы формирования мемориальных комплексов.

© Гурьева Е.И., Шутка А.В., Величко Г.М., 2025

Выводы. Приведены основополагающие принципы формирования архитектурно-пространственного решения мемориальных комплексов и особенности выстраивания градостроительной концепции: разработка концепции проекта, связанная с историей создания памятного места; использование символики архитектурных форм; включение мемориального ансамбля в структуру природно-рекреационного пространства с учетом градостроительной ситуации, улично-дорожной сети, организации удобных подъездов и подходов; формирование картины территориального восприятия пространства мемориала; пропорциональное построение архитектурно-пространственной композиции комплекса; включение в комплекс дополнительных эффектов; цветочное оформление; разработка системы освещения мемориального комплекса.

Ключевые слова: градостроительные структуры, мемориальный комплекс, архитектурно-пространственные решения, городские рекреационные пространства, архитектурное освещение

Для цитирования: Гурьева Е.И., Шутка А.В., Величко Г.М. Градостроительная концепция формирования архитектурно-пространственного решения мемориальных комплексов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 82–98. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-82-98. EDN: EAYMUQ

ORIGINAL ARTICLE

URBAN PLANNING CONCEPT OF ARCHITECTURAL SPACE FORMATION FOR MEMORIALS

Elena I. Gur'eva, Anna V. Shutka, Galina M. Velichko
Voronezh State Technical University ,Voronezh, Russia

Abstract. The article discusses the urban planning concept of memorials. The main principles of the memorial formation are analyzed, including architecture and planning, composition and artistry, landscape and construction.

The article substantiates the necessity and relevance of preserving the memory of the Great Patriotic War, heroism of soldiers. The presented key principles of architectural, constructive, landscape solutions of memorials, are based on the composition, landscape and recreation of urban situations.

The article considers the urban planning of modern memorials dedicated to the feat of the military, participants and heroes in the Great Patriotic War, the Soviet–Afghan War, special military operation in Ukraine. The attitude towards the conceptual and semantic paradigm of monuments and memorials is currently changing. The location of memorials in the urban structure, the size and shape of the site, accessibility of the territory, emotional and visual perception, interaction with the landscape, are important aspects of the architectural image formation. All this requires the analysis and rethinking of the socio-economic development.

Purpose: Identification of fundamental principles of memorial construction with respect to the urban planning structure, natural environment and especially adjacent buildings.

Methodology: The article highlights the landscape organization of memorials. The importance of the conceptual artistic approach to the landscape design is noted as well as the importance of choosing plants. Examples are given for the selection of color, texture and lighting techniques. The landscape solution of the memorial infrastructure is based on nuance and contrast. The monument inclusion in the landscape structure determines its style in the general plan. The concept of setting the memorial in contrast to surroundings provides for the use of a regular planning structure.

Research findings: Memorials are considered as a special type of public infrastructure in the urban environment. Today, public spaces are considered as conceptual multi-functional formations reflecting the main trends and changes in all spheres of life. Both urban planning tech-

niques and formation principles of memorials require a conceptual solution. The article presents the fundamental principles of architectural and spatial solutions of memorials and the urban planning concept.

Keywords: urban planning structure, memorial, architectural and spatial solutions, urban recreational spaces, architectural lighting

For citation: Gur'eva E.I., Shutka A.V., Velichko G.M. Urban Planning Concept of Architectural Space Formation for Memorials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 82–98. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-82-98. EDN: EAYMUQ

Введение

Мемориальные комплексы, посвященные событиям Великой Отечественной войны, Афганской войны, специальной военной операции на Украине, позволяют современному человеку осознать драматизм событий, почувствовать глубокий эмоциональный смысл. Преступления фашистов не имеют срока давности, не могут быть забыты и не должны повториться. Долг нашего народа – сохранить память об исторической истине, о событиях, погибших героях.

Мемориальные комплексы в городах России должны располагаться в структуре общественных пространств, быть открытыми для посещения, проведения памятных мероприятий и доступными по основным автомобильным магистралям. Они вносят определенный вклад в архитектурно-художественный облик города и влияют на формирование силуэта и узнаваемости места. В настоящее время необходимо разрабатывать концепцию мемориала с учетом современных тенденций создания памятных мест и в соответствии с высокими требованиями к благоустройству городских территорий.

Градостроительная специфика размещения мемориального комплекса

Война оставляет глубокий след в человеческой памяти на многие поколения. Все свидетельства войны являются источником для воссоздания образа военных драматических событий. Язык архитектуры мемориального комплекса многослойный, международный, межнациональный. Мемориальные комплексы сегодня рассматриваются как «чистая» архитектура, без прагматических примесей и добавок, не имеющая жестких технологических обязательств, не следующая прототипам, стандартам и нормам [1, с. 103]. На рис. 1–3 приведен многогранный анализ мемориальных комплексов в структуре современного города.

Размещение мемориального комплекса в городской структуре определяется множеством факторов: градостроительных, природных, социально-экономических, эстетических, мировоззренческих, средовых, эргономических. Выбор территории обусловлен: размещением мемориала непосредственно на месте прошедших военных событий; наличием особенной достопримечательной территории; пешеходной и транспортной доступностью; достаточной площадью; хорошей аэрацией и инсоляцией; наличием зеленых насаждений; возможностью организовать обзор для восприятия комплекса с различных точек и расстояний. Градостроительная специфика формирования мемориального комплекса предопределена сложившейся планировочной структурой города, улично-дорожной сетью, особенностями природно-рекреационного каркаса.

Рис. 1. Мемориальные комплексы, посвященные Великой Отечественной войне: «Воин-освободитель» в Берлине; Ржевский мемориал советскому солдату; «Саур-могила» в Донецкой области; «Трагедия народов» на Поклонной горе в Москве

Fig. 1. Memorials dedicated to the Great Patriotic War: "The Liberator Warrior" in Berlin; Rzhevsky Memorial to the Soviet soldier; "Saur-grave" in the Donetsk region; "The Tragedy of Peoples" on Poklonnaya Hill in Moscow

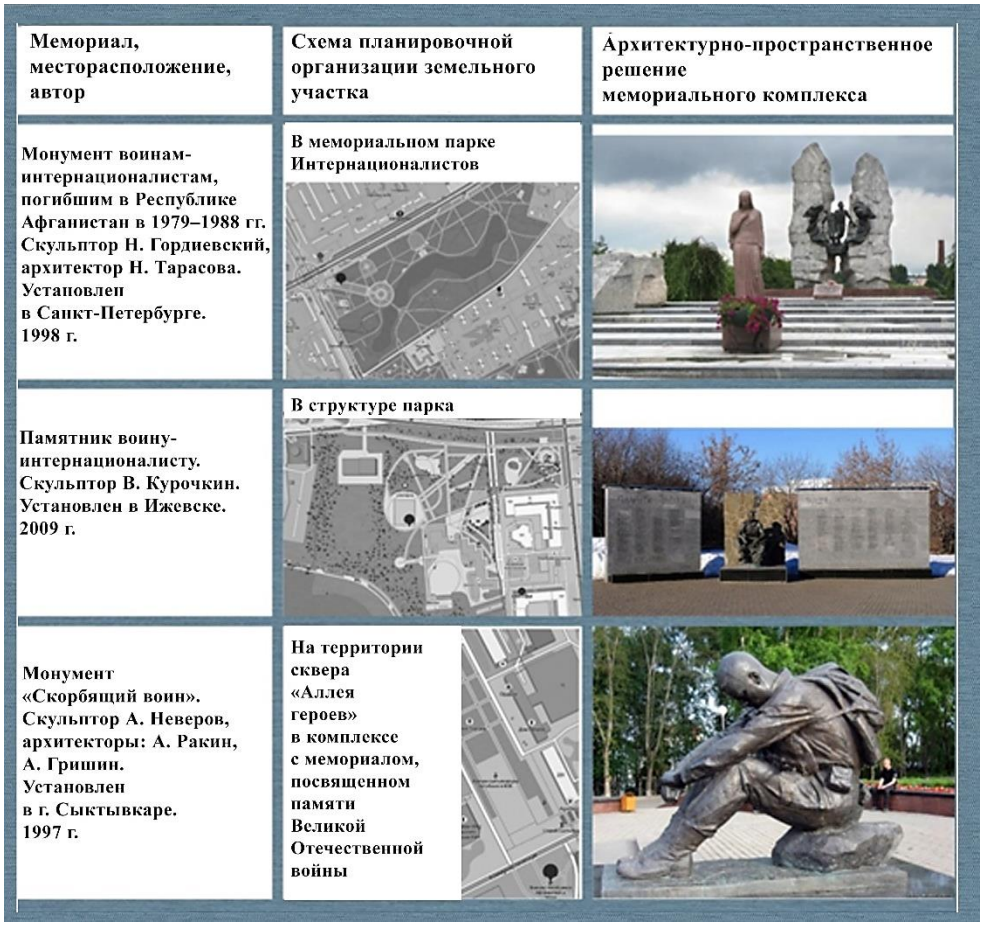


Рис. 2. Мемориальные комплексы, посвященные Афганской войне: монумент воинам-интернационалистам в Санкт-Петербурге; памятник воину-интернационалисту в Ижевске; монумент «Скорбящий воин» в Сыктывкаре

Fig. 2. Memorials dedicated to the Soviet–Afghan War: internationalist soldiers in Saint-Petersburg; internationalist soldier in Izhevsk; "A grieving soldier" in Syktyvkar

Архитектурно-планировочная структура мемориального комплекса часто носит регулярный характер. Композиция выстраивается на принципах индивидуальности и уникальности, упорядоченности, иерархичности, соподчиненности основных элементов построению от главного к второстепенному.

Решение по архитектурно-планировочной организации территории с учетом особенностей рельефа, месторасположения в градостроительной ситуации, а также трассировки инженерных коммуникаций отражается на схеме планировочной организации земельного участка (СПОЗУ). В графическую часть СПОЗУ включаются: границы земельного участка в соответствии с данными государственного кадастрового учета; существующие объекты капитального строительства; проектируемый объект; габаритные размеры объектов застройки, а также их привязка к границам земельного участка; границы зон с особыми условиями использования территории; условные обозначения, принятые на чертеже.

Рис. 3. Мемориальные комплексы, посвященные специальной военной операции на Украине: «Смерч журавлей» в Туапсе; «Героям специальной военной операции» в Борзе; «Мать встречает сына» в Забайкальском крае

Fig. 3. Memorials dedicated to the special military operation in Ukraine: "A whirl-wind of cranes" in Tuapse; "To the heroes of the special military operation" in Borzoi; "Mother meets son in Zabaykalsky Krai”

Архитектурно-художественная концепция мемориальных комплексов

В настоящее время мемориальные комплексы рассматриваются в городской структуре как особенные, уникальные общественные пространства. Современные тенденции формирования и развития общественных территорий: полифункциональность, гибкость к изменяющимся потребностям современного общества, внедрение инновационных технологий и материалов [2, с. 45].

Анализ мемориальных комплексов, посвященных памяти военных событий, героям, погибшим при защите Родины, показал общие архитектурно-градостроительные приемы: концептуальное построение ансамбля; символичность применяемых образов; включение мемориалов в структуру существующих рекреационных территорий; хорошее визуальное раскрытие для лучшего зритель-

ного восприятия. Концепция современного монументального ансамбля формируется с использованием синтеза искусств, во взаимодействии градостроительных, монументально-декоративных, историко-фактологических начал [3, с. 5].

Большое значение в организации архитектурного ансамбля мемориалов имеют отделочные материалы. Цвета и фактуры материала помогают выявить архитектурную пластику и подчеркнуть значимость идейного содержания. В мемориальном комплексе – памятнике жертвам фашизма «Хатынь» в Белоруссии – пешеходная аллея, ведущая от дороги к центру мемориала, выложена черными бетонными плитами. Используется черный лабрадорит для обозначения места гибели людей. При оформлении братской могилы контраст белого мрамора и черного лабрадорита эмоционально и стилистически выражает тему жизни и смерти. Серые бетонные обелиски, символизирующие печи сгоревших изб, динамично возвышаются по рельефу местности, подчеркивая тревожный ритм архитектурно-художественной композиции [4, с. 14].

На основе проведенного исследования были выявлены следующие градостроительные принципы размещения мемориального комплекса в структуре современного города: обоснованный выбор территории в структуре сложившегося мемориального ансамбля; возможное включение мемориала в структуру природно-рекреационного пространства; привязка памятного места к улично-дорожной сети и формирование удобных пешеходных подходов; организация функциональных зон в структуре комплекса с выделением входной, экспозиционной и рекреационной зон (рис. 4).

Рис. 4. Градостроительные принципы размещения мемориального комплекса в структуре современного города (окончание см. на с. 89)
Fig. 4. Urban planning principles of memorials in a modern city (see p. 89 for continuation)

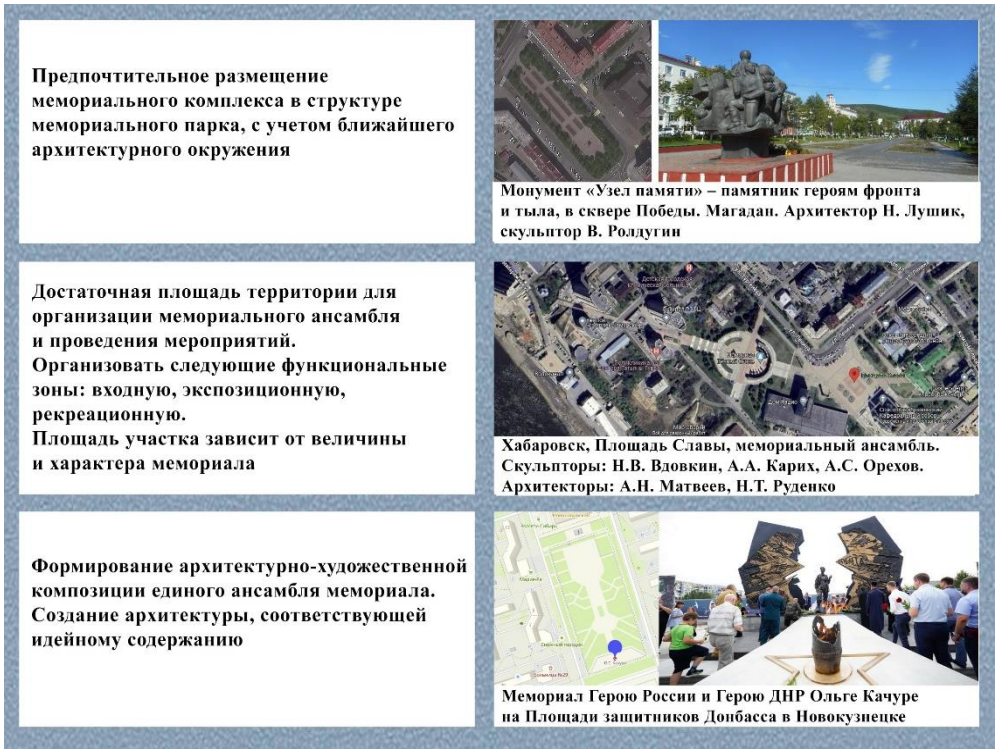


Рис. 4. Окончание (начало см. на с. 88)
Fig. 4. Urban planning principles of memorials in a modern city (see p. 88 for beginning)

Важным аспектом формирования ансамбля мемориального комплекса служит ландшафт. Определяющим этапом проектирования является архитектурно-ландшафтный анализ. Приступая к проектированию объектов ландшафтной архитектуры, необходимо изучить возможности преобразования территории, формирования объемно-пространственной композиции культурного ландшафта [5, с. 20].

Ландшафтная организация мемориальных комплексов

Ландшафтный дизайн в мемориальных комплексах играет ключевую роль в формировании особой атмосферы. Через сочетание природы и архитектурных элементов создается уникальное пространство, способствующее внутреннему созерцанию и почитанию. Растительность, водоемы, памятники – все это объединяется в единое целое, чтобы олицетворить идеи и ценности, которые несет в себе мемориальный комплекс.

Современное проектирование объектов ландшафтной архитектуры ведется на основе концептуального построения ансамбля. Концепция – важная тематическая составляющая проекта (рис. 5). Концепция служит основой для функционального зонирования, архитектурно-пространственного построения, планировочной структуры ансамбля, а также художественного стиля и стилевого наполнения среды [6, с. 130].

Рис. 5. Алгоритм создания мемориальной ландшафтно-архитектурной композиции
Fig. 5. Algorithm of creating memorial landscape and architectural composition

В основу ландшафтной организации современных мемориальных комплексов положены принципы художественного формирования пространства [7]. Для создания неповторимого образа памятного места необходимо сочетать элементы инженерного и ландшафтного благоустройства, а также грамотно проводить озеленение территории [8, 9]. Памятные места, как правило, должны иметь четкую структуру и быть оформлены в регулярном стиле. Это может быть как само благоустройство (дороги, площадки), так и ассортимент растений, которые они содержат [10, 11]. Правильная ориентация архитектурных пространств мемориалов, изучение возможностей их оптической связи с окружающей природой, композиционного строя природных форм и их потенциальных возможностей помогают формировать будущие ансамбли мемориальных комплексов [12].

В ландшафтном дизайне мемориальных комплексов часто применяются различные формы зеленых насаждений, чтобы подчеркнуть важность и торжественность этих мест. Например, для создания атмосферы траура и грусти выбираются пурпуролистные растения или плакучие формы, которые помогают передать эмоциональный оттенок уважения и скорби. В то же время для придания праздничного настроения могут использоваться яркие и разноцветные растения. Однако не только растения играют важную роль в оформлении мемориальных парков. Цветочное оформление также имеет огромное значение. Например, при создании атмосферы траура и памяти об ушедших часто используются цветы белой окраски, такие как розы, гвоздики, хризантемы и тюльпаны, символизирующие чистоту, покой и уважение к ушедшим.

Архитектурное освещение ансамбля мемориальных комплексов

При формировании мемориальных комплексов используется синтез искусств: архитектуры, скульптуры, живописи, ландшафтной композиции. Со-

временные светотехнические технологии могут помочь в создании концепции такого идеологически важного объекта, как мемориальный ансамбль. Некоторые памятные места, связанные с трагическими событиями Великой Отечественной войны, посещаются круглосуточно. Мемориальные комплексы размещаются на доминирующих высотах городского ландшафта. Гармоничное искусственное освещение, программируемые системы освещения должны стать эффективным элементом мемориального ансамбля.

Концепция освещения мемориала и окружающего пространства в вечернее время должна учитывать эмоциональное воздействие на посетителей. Световой дизайн следует использовать как необходимое и выразительное искусство [13, с. 313].

Создать многоуровневый световой дизайн возможно с применением следующих типов освещения: функционально-утилитарного, архитектурно-монументального и ландшафтно-художественного. Функционально-утилитарное – это освещение путей движения, аллей, дорожек, лестниц, открытых площадок. Архитектурно-художественное – это освещение мемориала, скульптур, обелисков, памятных знаков, зданий музеев в структуре мемориального комплекса. Ландшафтно-художественное – это освещение зеленых насаждений, водных устройств, рельефа.

Сложность в формировании освещения мемориального ансамбля состоит в решении системы подсветки, которая призвана подчеркнуть идейное содержание, основные композиционные объемы, фактуру, форму и цвет применяемых материалов. Основными приемами освещения являются: создание равномерного заливающего света, применение локальной точечной подсветки, использование цвета, включение динамичного светодиодного освещения. Большое значение имеет направление света, которое создает игру теней, выявляет рельеф, подчеркивает формы и линии.

При создании светового ансамбля используются следующие источники освещения: светильники на опорах и кронштейнах, линейные прожекторы, тротуарные и грунтовые осветительные приборы, парковые светодиодные светильники, ландшафтные световые столбики.

В качестве современного решения светового ансамбля может быть использован проект освещения Ржевского мемориала, который предусматривает не только формирование системы управления, но и обеспечение нескольких режимов работы: повседневного, праздничного и ночного (рис. 6).

При создании системы освещения Ржевского мемориала применялись различные приемы, которые подчеркнули композиционную авторскую идею. Основная скульптура воина освещается снизу вверх мощными светодиодными прожекторами. В архитектурной концепции памятника использован образ из знаменитой песни «Журавли» на стихи Расула Гамзатова. Стая журавлей подхватывает воина и несет его в лучшие места, уготованные для героев-защитников. С целью создания соответствующего визуального образа – посмертного вознесения души солдата в облике одного из журавлей – в мощение с лицевой стороны у основания скульптуры установлены светодиодные прожекторы встраиваемого типа [14]. Осветительными приборами подчеркнули движение от входа к мемориальным стенам и далее к основной скульптуре. Для создания

эмоционального эффекта было предусмотрено различное по цвету и интенсивности освещение.

Рис. 6. Система освещения Ржевского мемориала
Fig. 6. The memorial illumination in Rzhev

Конструктивные особенности формирования мемориальных комплексов

Для того чтобы реализовать художественный замысел архитектора, требуется сконструировать несущий каркас мемориала. Важно учитывать надёжность, долговечность и прочность конструкции.

Конструкции мемориальных сооружений могут представлять собой единую систему или комплекс пространственных систем. Конструктивные решения расчётных схем элементов многообразны и зависят от архитектуры объекта.

Чаще всего конструкторы используют каркасную систему из металлических конструкций, надежную и легковозводимую. И при необходимости реконструкции несложно будет заменить потерявший прочность элемент.

Современная инженерная методология использует различные физико-математические методы расчетов, учитывая различные виды нагрузок: нагрузку от собственного веса, ветровую нагрузку, снеговую [15]. Расчеты нагрузок строго регламентируют нормативные документы для различных климатических районов.

Создавая архитектурный ансамбль, важно учитывать толщину снежного покрова и его плотность. От термических и механических свойств снега зависит выбор материалов для каркаса и облицовки мемориала. Геометрия памятника может быть многообразной и тем самым усложнять расчет ветровой нагрузки.

Для воплощения идеи архитектора по результатам расчетов, обязательно с учетом физико-химических свойств облицовочных материалов [16], выполняется проект с детализацией его конструктивных элементов.

Облицовочные материалы для передачи задуманного архитектором облика монумента можно разделить на две категории: натуральные и искусственные. Современные технологии предлагают применять наряду с известными и популярными материалами – металлом и бетоном – литьевой мрамор и гранитополимер. Типы натуральных горных пород в нашей стране различны по разнообразию и богатству. Их также можно разделить на подгруппы: гранитоиды различных типов, кварциты, используемые для облицовки, мрамор, мраморизованные известняки и доломиты.

Методика проектирования мемориальных комплексов

Градостроительное формирование мемориального комплекса предполагает развитие архитектурной идеи от общего к частному, охватывает взаимодействие градостроительной концепции и художественно-композиционного решения. Б.Г. Бархин отмечает, что в настоящее время архитекторы используют комплексный метод проектирования, который предполагает одновременное решение градостроительных, функциональных, конструктивных, технических, экономических и архитектурно-художественных задач [17, с. 17].

Формирование градостроительной концепции – это сложная, многофакторная, комплексная задача [18, с. 193]. Творческий процесс разработки концепции включает: анализ, эскизирование, теоретическое моделирование, макетирование. Творческое мировоззрение архитектора складывается и развивается под влиянием изучения аналогичных объектов. В процессе проектирования мемориального комплекса используются продуктивная и репродуктивная формы деятельности. Приоритетной задачей является выработка оригинальной, нетривиальной идеи. Творческий процесс выработки идеи ориентируется на следующие методы: ассоциаций, преобразования, «вживания в роль», инверсии. Огромна роль интуиции, фантазии, воображения. Доминирующим может выступать философско-мировоззренческий метод [19, с. 27].

Процесс проектирования мемориалов состоит из последовательных этапов: ландшафтно-градостроительный анализ территории, разработка архитектурно-пространственного решения, выполнение конструктивно-технологического расчета, формирование ландшафтного благоустройства. Архитектурное решение детализируется и уточняется. Первоначально рассматриваются концептуальные предложения, которые формируются в настоящее время на конкурсной основе. В дальнейшем выбранная концепция разрабатывается как эскизное предложение, а далее уточняется, конкретизируется в рабочем проекте.

Мемориальные комплексы, посвященные памяти войн

В настоящее время разрабатывается проектное предложение по созданию мемориального комплекса, посвященного памяти Великой Отечественной войны, Афганской войны и специальной военной операции на Украине (рис. 7).

Рис. 7. Мемориальная композиция, символизирующая подвиг участников локальных войн и военных конфликтов, расположенная в с. Хохол Хохольского района Воронежской области

Fig. 7. Memorial for participants in local wars and military conflicts, located in the village of Khokhol, Khokholsky district, Voronezh Region

Комплекс будет располагаться в г. Россоши Воронежской области. Авторами проекта являются студенты 4-го курса: концепция А: Д.М. Истомина, В.В. Демидов, С.А. Орешков, П.П. Медведева; концепция Б: А.А. Вишнякова, С.С. Голева, С.А. Сигушина, В.Е. Фомина; руководители: Е.И. Гурьева, А.В. Шутка.

Заключение

Настоящее исследование показывает, что современные мемориальные комплексы необходимы для сохранения памяти героев, как символические свидетельства военных драматических событий. Осмысление темы войны, трагедии народов, увековечивание памяти воинов-героев отражается в решении философии и архитектуры мемориальных комплексов.

Градостроительная концепция формирования архитектурно-пространственного решения мемориальных комплексов выстраивается по следующим основополагающим принципам:

– разработка концепции проекта, связанная с историей создания памятного места;

– использование символики архитектурных форм;

– включение мемориального ансамбля в структуру природно-рекреационного пространства с учетом градостроительной ситуации, улично-дорожной сети, организации удобных подъездов и подходов;

– формирование картины территориального восприятия пространства мемориала;

– в архитектурно-пространственной композиции комплекса особое внимание уделяется пропорциональному построению, что обеспечивает гармоничное восприятие всего ансамбля, использование основных композиционных приемов для лучшего восприятия комплекса и раскрытие основной идеи проекта;

– включение в комплекс дополнительных эффектов, например звукового сопровождения;

– при создании мемориальных объектов и парков важно учитывать не только архитектурные элементы, но и растительное и цветочное оформление, чтобы передать нужные эмоциональные оттенки и уважение к памяти ушедших и историческим событиям, детали совместно создают особую атмосферу и помогают посетителям почувствовать глубину и значимость каждого мемориального объекта;

– разработка системы освещения мемориального комплекса и окружения на основе применения функционально-утилитарного, архитектурно-монументального и ландшафтно-художественного света с учетом повседневного, праздничного и ночного режимов работы.

Ансамбль современного мемориального комплекса должен формироваться как сложное, идеологически построенное сооружение с применением синтеза искусств и с учетом внедрения новых технологических решений.

Список источников

1. *Хомяков А.И.* Обратная перспектива: антология мемориально-музейной архитектуры / предисл. А.В. Бокова. Москва : URSS, 2021. 181 с. ISBN 978-5-9710-8075-6.

2. *Шутка А.В.* Градостроительные принципы формирования общественного центра города-спутника в структуре крупной агломерации // Инновации в социокультурном пространстве : материалы XVI Международной научно-практической конференции, 20 апреля 2023 г. Часть II. Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2023. С. 45–49. DOI: 10.22250/9785934934096_45
3. *Зайцев А.К.* Мемориальные ансамбли в городах-героях. Москва : Стройиздат, 1985. 208 с.
4. *Чантурия В.А.* Атлас памятников архитектуры и мемориальных комплексов Белоруссии. Минск : Вышая школа, 1983. 110 с.
5. *Шутка А.В., Гурьева Е.И.* Градостроительное проектирование ландшафтов. Основы проектирования ландшафтов. Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2020. 77 с. EDN: LYRRZA
6. *Шутка А.В., Гурьева Е.И.* Градостроительное проектирование ландшафтов: парк. Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2021. 158 с.
7. *Гурьева Е.И., Ульянкина В.А.* Воздействие человеческой деятельности на ландшафт (на примере г. Липецк) // Архитектурные исследования. 2018. № 3 (15). С. 71–80. EDN: YBDNZZ
8. *Кругляк В.В., Семенютина А.В., Гурьева Е.И.* Модели архитектоники рекреационных насаждений для адаптивных систем озеленения // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 3. С. 108–112. EDN: ZTLMQB
9. *Фролова М.Ю.* Оценка эстетических достоинств природных ландшафтов // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1994. № 2. С. 27–33.
10. *Vellas F.* The International Marketing of Travel and Tourism // A strategic Approach Great Britain. MacMillan Press Ltd., 2014. P. 35–37.
11. *Кругляк В.В., Гурьева Е.И., Горожанкина А.А.* Архитектурно-ландшафтная среда пешеходной улицы как форма существования ландшафта в условиях города (обзор) // Лесной вестник = Forestry Bulletin. 2024. Т. 28. № 2. С. 81–92. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-81-92
12. *Гурьева Е.И., Старооскольская Е.А., Попов Г.А.* Формирование архитектуры зеленых насаждений в жилой застройке города Воронеж // Актуальные вопросы устойчивого развития регионов, отраслей, предприятий : материалы Международной научно-практической конференции. В 2 томах, Тюмень, 15 декабря 2023 г. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. С. 247–251.
13. *Завгородская Т.Н.* Архитектурное освещение мемориальных комплексов // Architecture and Modern Information Technologies. 2020. № 2 (51). С. 305–315. URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/2kvart20/PDF/16_zavgorodskaya.pdf. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15116
14. *БЛ-ГРУПП выполнила проект освещения Ржевского мемориала*, который открыли Владимир Путин и Александр Лукашенко // Международная светодиодная корпорация : [сайт]. – URL: https://bl-g.ru/about/press_center/5084/
15. *Насонкин В.Д., Канцыбко А.И.* Статистический и динамический анализ памятника в ознаменование 300-летия Российского флота // Промышленное и гражданское строительство. 1997. № 12. С. 24–26.
16. *Микульский В.Г., Горчаков Г.И., Козлов В.В. и др.* Строительные материалы / под ред. В.Г. Микульского. Москва : Изд-во АСВ, 1996. 488 с.
17. *Бархин Б.Г.* Методика архитектурного проектирования. Москва : Стройиздат, 1982. 224 с.
18. *Кармазин Ю.И.* Творческий метод архитектора: введение в теоретические и методологические основы. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. 493, [3] с. ISBN 5-9273-0758-2.
19. *Кармазин Ю.И.* Формирование мировоззренческих и научно-методических основ творческого метода архитектора в профессиональной подготовке (концепция) : специальность 18.00.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора архитектуры / Кармазин Юрий Иванович. Москва : Мархи, 2006. 50 с.

References

1. *Khomyakov A.I.* Reverse Perspective: Anthology of Memorial and Museum Architecture. Moscow, 2021. 181 p. ISBN 978-5-9710-8075-6 (In Russian)
2. *Shutka A.V.* Urban Planning Principles of Public Center of Satellite City in Agglomeration Structure. In: *Proc. 16th Int. Sci. Conf. 'Innovations In The Socio-Cultural Space'*. April 20, 2023, Blagoveshchensk, 2023. Pp. 45–49. DOI: 10.22250/9785934934096_45 (In Russian)
3. *Zaitsev A.K.* Memorial Ensembles in Hero Cities. Moscow: Stroyizdat, 1985. 208 p. (In Russian)

4. *Chanturia V.A.* Atlas of Architectural and Memorial Complexes in Belarus. Minsk: Vysshaya shkola, 1983. 110 p. (In Russian)
5. *Shutka A.V., Gur'eva E.I.* Urban Planning of Landscape Design. Fundamentals of Landscape Design: Voronezh, 2020. 77 p. (In Russian)
6. *Shutka A.V., Gur'eva E.I.* Urban Planning Landscape Design: Park. Voronezh, 2021. 158 p. (In Russian)
7. *Gur'eva E.I., Ulyankina V.A.* Impact of Human Activity on Landscape (the Lipetsk case study). *Arkhitekturnye issledovaniya*. 2018; 3 (15): 71-80. (In Russian)
8. *Kruglyak V.V., Semenyutina A.V., Gur'eva E.I.* Models of Architectonics of Recreation Plantings for Adaptive Landscape Systems. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2017; (3): 108–112. EDN: ZTLMQB (In Russian)
9. *Frolova V.A.* Assessment of Aesthetic Advantages of Natural Landscapes. *Vestnik MGU. Ser. 5. Geografiya*. 1994; (2): 27–33. (In Russian)
10. *Vellas F.* The International Marketing of Travel and Tourism. A Strategic Approach. Great Britain: MacMillan Press Ltd., 2014. Pp. 35–37.
11. *Kruglyak V.V., Gur'eva E.I., Gorozhankina A.A.* Architectural and Landscape Environment of Pedestrian Street as a Form of Landscape Existence in a City (Review). *Lesnoi vestnik. Forestry Bulletin*. 2024; 28 (2): 81–92. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-81-92 (In Russian)
12. *Gur'eva E.I., Staroskolskaya E.A., Popov G.A.* Architecture of Greenspaces in Residential Buildings in Voronezh. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Regional and Industrial Development'*, in 2 vol. Tyumen, 2024. Pp. 247–251. (In Russian)
13. *Zavgorodskaya T.* Architectural Lighting of Memorials. Architecture and Modern Information Technologies. 2020; 2 (51): 305–315. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15116 (In Russian)
14. BL-GROUP completed the lighting project of the Memorial in Rzhev. Available: https://bl-g.ru/about/press_center/5084/ (In Russian)
15. *Nasonkin V.D., Kanzybko A.I.* Statistical and Dynamic Analysis of the Monument Devoted to the 300th Anniversary of the Russian Navy. *PGS ezhemesyachnyi nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi zhurnal*. 1997; (12): 24–26 (In Russian)
16. *Mikulsky V.G. (Ed.), Gorchakov G.I., Kozlov V.V., et al.* Building Materials. Moscow: ASV, 1996. 488 p. (In Russian)
17. *Barkhin B.G.* Architectural Design Methods. Moscow: Stroyizdat, 1982. 224 p. (In Russian)
18. *Karmazin Yu.I.* Architect's Creative Method: Introduction to Theoretical and Methodical Foundations. Voronezh, 2005. 493 p. ISBN 5-9273-0758-2. (In Russian)
19. *Karmazin Yu.I.* Formation of World Outlook and Scientific and Methodological Foundations of Creative Method of Architect in Professional Training (Concept). DSc Abstract. Moscow. 2006. 50 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Гурьева Елена Ивановна, канд. с.-х. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, gurjeva_el@mail.ru

Шутка Анна Викторовна, канд. архитектуры, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, shutka.a@yandex.ru

Величко Галина Михайловна, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, veli4kogalina@yandex.ru

Authors Details

Elena I. Gur'eva, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, gurjeva_el@mail.ru

Anna V. Shutka, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, shutka.a@yandex.ru

Galina M. Velichko, A/Professor, Senior Lecturer, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, veli4kogalina@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 20.06.2024
Одобрена после рецензирования 17.01.2025
Принята к публикации 21.01.2025

Submitted for publication 20.06.2024
Approved after review 17.01.2025
Accepted for publication 21.01.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 99–109.

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 (1): 99–109.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 72.01
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-99-109 EDN: FQARST

АРХИТЕКТУРНАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ ОТ АТАКИ БПЛА

Екатерина Романовна Полянцева
Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. *Актуальность*. В настоящее время актуальными становятся вопросы обеспечения безопасности зданий при террористических актах разного характера, в том числе при атаках беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). В исследовании рассмотрены варианты архитектурных средств защиты фасадов и внешних элементов зданий от данной угрозы, а также варианты построения объемно-планировочной структуры для обеспечения максимальной защиты находящихся в здании людей. В данном случае становится особенно важным соблюсти баланс между фактической и воспринимаемой безопасностью, избегая создания образа средневековой крепости, однако учитывая потенциальные риски и угрозы террористического характера.

Методика исследования включает в себя изучение данных о существующих при атаке БПЛА рисках и угрозах в отношении зданий и находящихся в них людей, сравнительный анализ нормативной литературы по антитеррористической защите, отечественной и зарубежной, анализ существующих способов и приемов защиты зданий средствами архитектуры и дизайна среды и систематизацию данных средств по категориям на основе структурно-типологического метода.

Результаты. В качестве результатов исследования приводятся сравнительные таблицы, сделанные на основании рассмотренных материалов. Аналитические материалы включают в себя также описание моделей построения объемно-планировочной структуры и чек-лист средств, находящихся в арсенале архитектора для защиты зданий.

Выводы исследования указывают на то, как важно учитывать требования безопасности на всех этапах жизненного цикла здания, начиная от проектирования и заканчивая его эксплуатацией и возможной реконструкцией с учетом увеличившихся требований к защите.

Ключевые слова: безопасность, антитерроризм, строительство, архитектура, фасад, защита, БПЛА

Для цитирования: Полянцева Е.Р. Архитектурная защита зданий от атаки БПЛА // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 99–109. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-99-109. EDN: FQARST

© Полянцева Е.Р., 2025

ORIGINAL ARTICLE

ARCHITECTURAL PROTECTION OF BUILDINGS AGAINST UAV ATTACK

Ekaterina R. Polyantseva
Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The problem of building security in the case of different terrorist acts, including drone attacks, is rather relevant today. The article considers the architectural protection of facades and external building elements from this threat as well as building volume-planning structure to ensure the maximum protection of people in buildings. This problem is especially important to strike a balance between actual and perceived security, not designing a medieval fortress, but taking possible risks and terrorist threats into account.

Methodology: Investigation of existing risks and threats to buildings and people in them during an attack, comparative analysis of regulatory documents on anti-terrorist protection in Russia and abroad, the analysis of existing building protection techniques through the architecture and environmental design and their systematization based on the structural-typological method.

Research findings: Comparative tables based on the materials reviewed. Analytical materials include the building model description and architectural tools used to protect buildings.

Value: Indicates is the importance of safety requirements at all stages of the building life cycle, from design to operation and possible renovation to meet the increased protection requirements.

Keywords: security, anti-terrorism, construction, architecture, facade, defense, unmanned aerial vehicle

For citation: Polyantseva E.R. Architectural protection of buildings against UAV attack. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 99–109. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-99-109. EDN: FQARST

Введение

В то время как возрастает значимость антитеррористической безопасности, становится важно понимать потенциальные угрозы и опасности, связанные с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), или дронами. Они могут предоставлять информацию о правительственных зданиях, например, о входах и выходах, а также о принятых в них мерах безопасности. В чужих руках эта информация может быть использована для планирования последующих атак.

Работа беспилотного летательного аппарата может быть нарушена или выведена из строя с помощью средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), но использование последних строго регулируется и требует получения специальной лицензии или разрешения от соответствующих органов. В свою очередь, архитектурно-строительные и ландшафтно-средовые методы, заложенные изначально или при реконструкции и приспособлении для нужд защиты, действуют постоянно и не требуют дополнительного наблюдения. Однако важно учитывать потенциальные ограничения этих решений и следить за тем, чтобы они соответствовали местным нормам. Таким образом организации смогут лучше защищать свои активы и обеспечивать безопасность сотрудников и посетителей.

Следует обозначить, что беспилотные летательные аппараты, или дроны, могут иметь разное назначение, конструкцию и, соответственно, уровень угрозы, который с собой несут: аппараты разведывательного назначения, для нанесения

ударов и т. д. В исследовании будут рассмотрены средства антитеррористической защиты различного характера: от несанкционированного наблюдения до угрозы взрыва и падения представляющих опасность обломков.

Существующие источники описывают способы защиты от атаки беспилотными летательными аппаратами, однако применительно к архитектуре и ее свойствам данная тема до сих пор не рассматривалась, а потому имеет особую актуальность. В публикациях изучается использование принципов создания безопасной архитектурной среды для предотвращения военных преступлений [1], указывается, что комбинация архитектурных, ландшафтно-средовых и других средств предлагает многообещающие стратегии предупреждения военной преступности и террористических актов, но важно понимать, что это не всеобъемлющее решение. В качестве мер защиты от дронов, применяемых в террористических целях, называют использование средств подавления сигнала, вредоносного программного оборудования, радиопомех [2]; в числе физических средств защиты могут быть названы защитные сети [3, с. 6–7]. Другим упоминаемым исследователями аспектом является то, что условия плотной городской застройки сами по себе повышают риск ударов и повреждений зданий [4, 5]. Отдельные исследования указывают на то, что минимальные защитные меры, предусмотренные в архитектуре зданий, могут сказываться на работе дронов и привести к урону [6]; часть сигнала в условиях плотной застройки может теряться; также рассеивающим и мешающим фактором являются кроны деревьев, провода и т. д [7, с. 1–4].

Светомаскировка, улавливающие устройства и сети, повреждение электроники и искажение сигнала – известные методы активной борьбы с дронами, однако против них появляются все новые виды противодействия: меняется форма БПЛА, методы управления ими, способы маскировки. Способы нейтрализации, рассмотренные в исследованиях, подчеркивают важность раннего обнаружения БПЛА и улучшения способов защиты, в том числе атакуемых целей [8, с. 94–96]. В качестве профилактических мер важен предварительный анализ мест возможной атаки: наличие на территории уникальных, технически сложных, значимых объектов, зданий повышенной вместимости. Использование средств маскировки и конструкций, защищающих объекты инфраструктуры от возможного взрыва, в том числе конструктивные системы зданий и сооружений или стальные сетки, также являются значимыми [9, с. 28; 10].

Анализ отечественных исследований позволяет сделать схожие выводы в отношении вопросов защиты объектов. Изученные в статье Е.Б. Гурьева [11, с. 71–72] проблемы защиты позволяют сделать вывод о необходимости совершенствования мер защиты: «Для повышения уровня безопасности и обеспечения полной защиты территориальных объектов от БПЛА необходимо разработать новые методы и средства… в связи с использованием террористическими организациями беспилотных летательных аппаратов для нападения на важные и особо важные объекты (видеосъемка, фотографирование, причинение повреждений зданиям, сооружениям, объектам инфраструктуры)». Анализ разных видов атак показывает, что особенно опасна атака роем дронов, поскольку в этом случае при достаточно высокой плотности налета проблема защиты объекта становится практически неразрешимой из-за быстрого насыщения средств

обнаружения и поражения системы защиты, а также большого числа уцелевших БПЛА к объектам защиты и ограниченных возможностей использования вблизи них защитных боеприпасов высокого могущества.

Выход из этого положения – увеличение размеров и эшелонирование зоны ответственности системы защиты [12, с. 147–197].

Указываются также уязвимые места БПЛА: низкая прочность, слабая пробивная способность [13, с. 49]. Системы защиты предполагают использование средств анализа и перехвата, а также программ, подменяющих сигналы, или сигнализирующих средств раннего обнаружения [14, с. 77–78]. Пассивная защита гражданской инфраструктуры указывает на применение защитных решеток, сетей, световой маскировки [15, с. 86–87].

Зарубежные руководства по проектированию в качестве средств защиты фасадов зданий от атак и взрывов с воздуха предлагают уделять особенное внимание остеклению и иным проемам, выходящим на фасад [16, гл. 3]. Ещё одной мерой защиты является защитное озеленение. Руководство по предотвращению терактов в городской среде указывает на важность обеспечения защитных расстояний и деление участка здания на уровни защиты, первый из которых предполагает общий доступ, а третий, вблизи фасада и входов в здание, – наибольшую защиту [17, гл. 3-2].

Практически все указанные источники, российские и зарубежные, рассматривают в основном вопросы активной защиты средствами РЭБ, перехвата сигнала, не касаясь проблем и особенностей защиты архитектурных объектов.

В отношении участка здания обычные меры защиты предполагают установку защитных дистанций, однако в отношении дронов и атак с воздуха данная защитная мера теряет действенность. Невозможно закрыть весь участок здания защитным куполом, однако необходимо защитить наиболее уязвимые места: оконные и дверные проемы, вентиляционные шахты и другие отверстия на фасаде, а также располагать наиболее уязвимые элементы конструкции в защищенных местах. Выбор защитных средств предваряет процесс оценки уязвимости здания. Также зарубежные нормативные акты предлагают внедрение многоуровневой системы защиты, которая позволит лучше контролировать периметр и минимизировать разрушения. При этом первый уровень обеспечивает территориальную защиту участка здания; второй – периметральную защиту фасада, т. е. внешних границ самого объекта; третий – внутреннюю защиту, т. е. безопасность конструкций и отделочных материалов.

Таким образом, цель данного исследования – изучение объемно-планировочных и ландшафтно-средовых методов и средств защиты зданий от террористических угроз, в том числе с использованием дронов.

Задачи исследования:

– анализ нормативной, методической и другой литературы по теме защиты зданий от террористических актов;

– изучение существующего опыта по защите зданий и сооружений от атак и наблюдения БПЛА;

– систематизация выявленных объемно-планировочных средств и способов обеспечения безопасности;

– составление алгоритма действий при проведении анализа относительно приспособленности и устойчивости здания к возможным атакам.

Методы исследования

Методика исследования рисков включает в себя изучение данных о существующих при атаке БПЛА угрозах в отношении зданий и находящихся в них людей, сравнительный анализ отечественной и зарубежной литературы по антитеррористической защите, анализ существующих способов и приемов защиты зданий средствами архитектуры и дизайна среды и систематизацию данных средств по категориям на основе структурно-типологического метода.

Метод предварительной оценки проводится в отношении существующего объекта (здания, комплекса зданий) и включает в себя следующие шаги:

– идентификация угрозы: ее тип, уровень вероятности;

– оценка имеющихся в распоряжении защитных средств;

– выявление потенциальных уязвимых мест в объемно-планировочной структуре здания;

– анализ итоговых рисков, который помогает оценить вероятность того или иного вида атак, исходя из анализа угроз и уязвимостей.

Первым шагом реализации метода будет выявление относительных рисков, которые определяют, какие уязвимые точки или места в объемно-пространственной структуре здания подвержены наибольшему риску исполнения конкретных угроз, что позволяет выбрать подходящие методы защиты для дальнейшего выбора защитных средств.

Очень высокая вероятность исполнения угроз при очень малых последствиях может потребовать минимальных мер по смягчению, но очень низкая вероятность возникновения событий с очень серьезными последствиями, такими как большие обрушения конструкций, может потребовать дорогостоящих и сложных мер по смягчению последствий.

Второй шаг – анализ характеристик участка и самого объекта; на уязвимость влияют такие параметры, как ландшафт, размер, форма здания или комплекса зданий и их взаимное расположение, имеющаяся на участке растительность – кусты и деревья. Для отдельного здания важны такие параметры, как отделка фасада, материалы и характеристики поверхностей.

Основными угрозами со стороны БПЛА являются угроза наблюдения и угроза взрыва или атаки на здание снаружи. Соответственно, важность приобретают перечисленные выше защитные характеристики, которые могут быть сгруппированы в зависимости от двух данных угроз.

В числе основных угроз, помимо наблюдения и опасности прямых атак и взрывов, можно назвать также биологическое, химическое и другие виды заражения, при этом заражающие вещества дроны могут нести на себе и атаковать системы вентиляции и просто открытые проемы в зданиях – по этой причине важно защищать воздухозаборные отверстия, располагать их в шахтах, в углублениях фасада и закрывать защитными сетками.

На третьем шаге предварительной оценки принимаются решения о том, где и как минимизировать риски на этапе проектирования и строительства и при необходимости в течение срока эксплуатации здания. В этом процессе выявляются общие цели и задачи смягчения последствий, а также преимущества каждого потенциального варианта.

Защитные меры в отношении самих зданий предполагают выбор оптимальной стратегии. Проектировщик располагает широким спектром средств на разных уровнях проектирования: от конфигурации здания до выбора отделочных материалов внутренних помещений. Наиболее защищенными и безопасными будут в этом случае вземленные здания, которые нуждаются только в защите входных зон, вытяжных шахт и световодов, наиболее уязвимыми – высотные, с большим количеством остекления и проемов, уязвимых для потенциальных воздушных угроз. Здания небольшой этажности имеют высокий потенциал защиты благодаря возможности применения ландшафтного озеленения, защитных сеток и других средств.

Форма плана объекта должна быть простой, поскольку изрезанный периметр увеличивает фасадную площадь. Наличие внутренних углов и стыков плоскостей является фактором, увеличивающим потенциальный ущерб в случае атак с возможностью взрыва, увеличивая площадь разрушений.

Отделка фасада, несмотря на многослойность, не должна вызывать разрушений при атаке. Отделочные материалы должны быть легкими и безопасными при разрушении (в ином случае возникает риск поражения людей падающими осколками).

Результаты исследования

Поскольку атаки БПЛА в основном носят локальный характер, сплошное усиление или проектирование внешней защитной оболочки здания может оказаться избыточной мерой. Целесообразно сосредоточиться на минимизации ущерба от разрушения отдельных частей конструкций, особенно стеклянных и фасадных систем, которые при взрыве разрушаются с образованием острых осколков. Сохранение целостности внешних слоев и оболочек здания приобретает в данном случае решающее значение. Остекленные поверхности, если они присутствуют, можно располагать за защитными сетками, ламелями и другими элементами, которые способствуют отдалению места взрыва и рассеиванию взрывной волны. Здания должны быть спроектированы таким образом, чтобы минимизировать последствия применения взрывчатых веществ. Последствия взрыва могут быть различными, как и меры противодействия: можно ограничиться использованием взрывозащищенных покрытий при строительстве объекта или применять конструкции, учитывающие подобный риск. В случае реконструкции для обеспечения безопасности существующих зданий можно использовать установки с элементами, поглощающими и рассеивающими энергию потенциального взрыва или столкновения беспилотного летательного аппарата.

Физические барьеры, такие как сетки, заборы и специально спроектированные конструкции, также могут быть эффективными средствами защиты от БПЛА. Обеспечивая дополнительный уровень защиты, физические барьеры могут ещё больше затруднить проникновение дронов в воздушное пространство здания и исключить разрушения. Варианты использования защитных средств для участка и для фасада здания указаны в таблице.

Примером защиты периметра может служить здание фабрики в Италии, выполненное архитектурной группой LCA Architetti. Форма фасада, расположение окон в нишах, защищенных изгибом стен, минимизация числа наружных проемов подчеркивают защищенный характер наружного периметра здания [18].

Средства архитектурной защиты от атак БПЛА
Architectural defense against UAV attacks

Виды угроз	Архитектурные средства	
	на уровне участка здания	на уровне фасада здания
Защита от наблюдения	Деревья и кусты Защитная сетка Покрытие с защитными характеристиками материала (светоотражающее и т. д.)	Рассеивающие свойства материалов отделки Сплошная поверхность с невозможностью считать объемно-планировочные характеристики помещений с фасадной плоскости Фальшфасад на относе от основного Озеленение фасадных плоскостей и кровли Вземленные здания
Защита от взрыва или атаки	Защитные свойства ландшафта: активный рельеф Использование закрытых, подземных площадей Установка необходимых защитных расстояний	Применение безопасных при разрушении материалов Многослойность фасада Ламели и сетки Защитные оболочки

Стены выполняют роль экранов, легкий материал (дерево) минимизирует возможный ущерб в случае атаки (рис. 1).

Рис. 1. Производственное здание, Санто Стефано, Италия, 2023 г. [18]
Fig. 1. Industrial building, Santo Stefano, Italy, 2023

Примером защиты от несанкционированного наблюдения со стороны БПЛА является инновационный исследовательский центр «Техноверсум» в Ретлингене, Германия, выполненный архитектурным коллективом allmannwappner + Menges Scheffler Architekten + Jan Knippers Ingenieure [19]. Это первое

в своём роде здание с фасадом из тканой плитки из углеродного и стекловолокна. Здание является символом потенциала инновационных материалов на основе волокон. Плиты из волокон и нитей, образующие фальшфасад на относе от основного фасада, являются защитным средством, создавая оболочку, не позволяющую наблюдать за происходящим внутри, но допускающую беспрепятственный обзор изнутри наружу (рис. 2).

Рис. 2. Исследовательский центр, Ретлинген, Германия, 2023 г. [19]
Fig. 2. Research Center, Reutlingen, Germany, 2023

Проанализированные примеры помогают определить архитектурные средства защиты от атак БПЛА.

Фасадные системы:

– защитные сетки;

– оболочки;

– многослойные фасады и фальшфасады;

– окна, витражи, в том числе заглубленные окна, окна маленького размера (не ленточные), с частым делением на импосты.

Планировочные элементы: взрывобезопасные зоны внутри зданий без проемов в наружных стенах, на первых этажах зданий, в подвалах или на верхних этажах, но с возможностью быстрой эвакуации.

Конструктивная система:

– каркас с устойчивостью к нагрузкам при взрывах;

– оболочковая конструктивная система, где внешний контур, который может подвергнуться атаке, не связан конструктивно с внутренними несущими элементами.

Заключение

Беспилотные летательные аппараты представляют угрозу как для критической инфраструктуры, так и для людей. Существующие системы защиты требуют постоянного совершенствования и адаптации к новым условиям.

Дополнительной проблемой является недостаточная готовность большинства объектов, стратегически важных для безопасности государства, включая объекты критически важной инфраструктуры, к отражению атак с применением отдельных БПЛА или роев дронов. Это делает такие объекты уязвимыми перед данными угрозами, увеличивая вероятность успеха подобной атаки из-за низкой эффективности существующих систем борьбы с дронами. Предпринимаются усилия по поиску новых, более эффективных методов обнаружения и защиты от атак. Потому помимо активного противодействия важной становится защита самих объектов, их физической составляющей. Гражданская инфраструктура городов, и отдельные здания в частности, нуждаются в обеспечении защиты на этапе проектирования или последующего приспособления к новым требованиям безопасности. Архитектурные средства защиты призваны помочь ее обеспечению наравне с другими факторами, такими как подготовка персонала и вовлечение общественности, которые также играют важную роль в создании безопасной обстановки в настоящее время.

Список источников

1. *Seung Ho Lee*. The Effect of the Application of CPTED for the Prevention of Military Crime // Community Safety And Environmental Design Journal (Korea CPTED Association). 2023. V. 14. I. 1. P. 101–126. DOI: 10.26470/JCSSED.2023.14.1.101
2. *Dubravova H., Bures V.* Review of the Application of Drones for Smart Cities // IET Smart Cities. 2024. V. 6. № 4. P. 312–332. DOI: 10.1049/smc2.12093. URL: https://www.researchgate.net/publication/385320360_Review_of_the_application_of_drones_for_smart_cities (дата обращения: 12.10.2024).
3. *Falorca J., Miraldes J.* New Trends in Visual Inspection of Buildings and Structures: Study for the Use of Drones // Open Engineering. 2021. V. 11. P. 734–743. DOI: 10.1515/eng-2021-0071
4. *Drone Defence*: Drone Security Defence Solutions. URL: https://www.dronedefence.co.uk/ (дата обращения: 13.10.2024).
5. *Rizwan Majeed, Nurul Azma Abdullah*. Drone Security: Issues and Challenges // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2021. June. V. 12. № 5. P. 720–729. DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120584. URL: https://www.researchgate.net/publication/352086927_Drone_Security_Issues_and_Challenges (дата обращения: 13.10.2024).
6. *Du H., Heldeweg M.* Responsible Design of Drones and Drone Services – A Synthetic Report // SSRN Electronic Journal. 2017. January. DOI:10.2139/ssrn.3096573. URL: https://www.researchgate.net/publication/322688425_Responsible_Design_of_Drones_and_Drone_Services_-_A_Synthetic_Report (дата обращения: 13.10.2024).
7. *Ameer H., Urooj A., et al.* Unmaned Aerial Vehicles Threats and Defence Solutions // Conference: 2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC). November 2020. DOI: 10.1109/INMIC50486.2020.9318207. URL: https://www.researchgate.net/publication/348639407_Unmaned_Aerial_Vehicles_Threats_and_Defence_Solutions (дата обращения: 13.10.2024).
8. *Łukasiewicz J., Kobaszyńska-Twardowska A.* Proposed Method for Building an Anti-Drone System for the Protection of Facilities Important for State Security // Security and Defence Quarterly. 2022. June. P. 88–107. DOI: 10.35467/sdq/149268. URL: https://www.researchgate.net/publication/361193344_Proposed_method_for_building_an_anti-drone_system_for_the_protection_of_facilities_important_for_state_security (дата обращения: 13.10.2024).
9. *Łukasiewicz J., Piekarski M.* Polskie Security of Critical Infrastructure Against Threats from Unmanned Platforms / Towarzystwo Bezpieczeństwa Narodowego // Report PTBN. 2021. V. II. URL: https://www.researchgate.net/publication/354765319_polskie_towarzystwo_bezpieczenstwa_narodowego_security_security_of_critical_of_critical_infrastructure_infrastructure_against_threats_against_threats_from_unmanned_from_unmanned_platforms_platforms_Re (дата обращения: 12.10.2024).

10. *Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko A.D.* Protection of construction sites from unmanned aerial vehicles using mesh fences // Строительные материалы и изделия = Construction Materials and Products. 2024. Т. 7. № 6. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-6-6. EDN: MGUPKI. URL: https://bstu-journals.ru/archives/12209
11. *Гурьев Е.Б., Долбинин А.А.* Особенности организации деятельности органов внутренних дел по отражению нападения на административные здания территориальных органов МВД России // Экстремальные ситуации, конфликты, социальное согласие : сборник материалов XXV Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 66–73. EDN: NFRKPI
12. *Макаренко С.И., Тимошенко А.В.* Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147–197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304
13. *Сильников М.В., Лазоркин В.И.* Защита стационарных и мобильных объектов от роя БПЛА-камикадзе // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2022. № 3 (123). С. 46–50. DOI: 10.53816/20753608_2022_3_46
14. *Коломоец Р.В.* Защита гражданских объектов от беспилотных летательных средств // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (189–190). С. 75–79. DOI: 10.53816/23061456_2024_3-4_75. EDN: TSOHFZ
15. *Молчанов И.А., Паниева С.Л.* Способы защиты зданий и сооружений от действия использования БПЛА // Информационные системы и технологии АПК и ПГС : сборник научных статей Международной научно-технической конференции. В 2 томах. Курск, 2023. С. 85–88. EDN: WDNOLG
16. *FEMA 426*. Reference Manual To Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings. U.S. Department of Homeland Security. 2003. December. 420 p. URL: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema426_0.pdf (дата обращения: 12.10.2024).
17. *FEMA 430*. Guidance Against Potential Terrorist Attacks. Site and Urban Design for Security. U.S. Department of Homeland Security. 2007. December. 272 p. URL: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema430.pdf (дата обращения: 12.10.2024).
18. *N Building*. LCA Architetti. Luca compri architetti // ArchDaily. 2024. 14 Jul. URL: https://www.archdaily.com/1018737/n-building-lca-architetti-luca-compri-architetti (дата обращения: 12.10.2024).
19. *Texoversum Innovation Center*. Allmannwappner + Menges Scheffler Architekten + Jan Knippers Ingenieure // ArchDaily. 2023. 31 Oct. URL: https://www.archdaily.com/1009028/texoversum-innovation-center-allmannwappner (дата обращения: 12.10.2024).

References

1. *Seung Ho Lee*. The Effect of the Application of CPTED for the Prevention of Military Crime. *Community Safety and Environmental Design Journal (Korea CPTED Association)*. 2023; 14 (1): 101–126. DOI: 10.26470/JCSSED.2023.14.1.101
2. *Dubravova H., Bures V.* Review of the Application of Drones for Smart Cities. *IET Smart Cities*. 2024; 6 (4): 312–332. DOI: 10.1049/smc2.12093
3. *Falorca J., Miraldes J.* New Trends in Visual Inspection of Buildings and Structures: Study for the Use of Drones. *Open Engineering*. 2021; 11: 734–743. DOI:10.1515/eng-2021-0071
4. Drone Defence: Tailored drone security solutions. Available: www.dronedefence.co.uk (accessed October 13, 2024).
5. *Rizwan Majeed, Nurul Azma Abdullah*. Drone Security: Issues and Challenges. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. June 2021; 12 (5): 720–729. DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120584
6. *Du H., Heldeweg M.A.* Responsible Design of Drones and Drone Services: Legal Perspective Synthetic Report. *SSRN Electronic Journal*. 2017. DOI: 10.2139/ssrn.3096573
7. *Ameer H., Urooj A., et al.* Unmaned Aerial Vehicles Threats and Defence Solutions. In: *Proc. IEEE 23rd Int. Multitopic Conf.* November 2020. DOI: 10.1109/INMIC50486.2020.9318207
8. *Łukasiewicz J., Kobaszyńska-Twardowska A.* Proposed Method for Building an Anti-Drone System for the Protection of Facilities Important for State Security. *Security and Defence Quarterly*. 2022; 88–107. DOI: DOI:10.35467/sdq/149268

9. *Łukasiewicz J., Piekarski M., Szlachter D.* Polskie towarzystwo bezpieczeństwa narodowego security of critical infrastructure against threats from unmanned platforms. Report PTBN, 2021; II (2). Available: www.researchgate.net/publication/354765319_polskie_towarzystwo_bezpieczenstwa_narodowego_security_security_of_critical_of_critical_infrastructure_infrastructure_against_threats_against_threats_from_unmanned_from_unmanned_platforms_platforms_Re (accessed October 12, 2024).
10. *Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko A.D.* Protection of Construction Sites from Unmanned Aerial Vehicles Using Mesh Fences. *Construction Materials and Products*. 2024; 7 (6). https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-6
11. *Gur'ev E.B., Dolbinin A.A.* Organization of Internal Affairs Activities to Repel Attacks on Administrative Buildings of the Ministry of Internal Affairs of Russia. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Extreme Situations, Conflict, and Social Harmony'*. Moscow, 2023. Pp. 66–73. (In Russian)
12. *Makarenko S.I., Timoshenko A.V.* Analysis of Means and Methods of Countering Unmanned Aerial Vehicles. Part 2. Fire Damage and Physical Interception. *Sistemy upravleniya svyazi i bezopasnosti*. 2020; (1): 147–197. DOI: 10.53816/20753608_2022_3_46 (In Russian)
13. *Sil'nikov M.V., Lazorkin V.I.* Defense of Stationary and Mobile Objects From a Swarm of Drones-Kamikaze. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2022; 3 (123): 46–50. (In Russian)
14. *Kolomoets R.V.* Protection of Civil Objects from Unsupplied Aircraft. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu*. 2024; 3–4 (189–190): 75–79. DOI: 10.53816/23061456_2024_3-4_75. EDN: TSOHFZ (In Russian)
15. *Molchanov I.A., Panieva S.L.* Building Protection from UAV. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Information Systems and Technologies of Agroindustrial Complex and Industrial and Civil Construction'*, in 2 vol. Kursk, 2023. Pp. 85-88. EDN: WDNOLG (In Russian)
16. FEMA 426. Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings. December 2003. 420 p. Available: www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema426_0.pdf (accessed October 12, 2024).
17. FEMA 430. Guidance against potential terrorist attacks. Site and Urban Design for Security. December 2007. 272 p. Available: www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema430.pdf (accessed October 12, 2024).
18. N Building. LCA Architetti/luca compri architetti. Available: www.archdaily.com/1018737/n-building-lca-architetti-luca-compri-architetti (accessed October 12, 2024).
19. Texoversum Innovation Center. Allmannwappner+Menges Scheffler Architekten+Jan Knippers Ingenieure. Available: www.archdaily.com/1009028/texoversum-innovation-center-allmannwappner (accessed October 12, 2024).

Сведения об авторе

Полянцева Екатерина Романовна, канд. архитектуры, доцент, Уральский государственный экономический университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 62, notneb@yandex.ru

Author Details

Ekaterina R. Polyantseva, PhD, A/Professor, Ural State University of Economics, 62, 8 Marta Str., 620144, Yekaterinburg, Russia, notneb@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.11.2024
Одобрена после рецензирования 06.12.2024
Принята к публикации 13.12.2024

Submitted for publication 23.11.2024
Approved after review 06.12.2024
Accepted for publication 13.12.2024

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 110–117.

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 (1): 110–117.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 725.2
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-110-117 EDN: GYQTSF

СООТНОШЕНИЕ ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ В КОВОРКИНГАХ

Святослав Игоревич Семенов
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Пространства коворкингов представляют собой совокупность открытых и закрытых зон, в которых осуществляется различного рода деятельность резидентов коворкингов. Пространство и его место в структуре коворкинга влияет на формирование среды и условий для определенного вида деятельности (для каждой деятельности предусмотрено свое пространство).

Актуальность. На сегодняшний день вопрос соотношения открытых и закрытых пространств является актуальным в связи со степенью влияния пространственных решений (открытых и закрытых пространств) на возможность и эффективность экономической (производственной) деятельности людей.

В настоящей работе на основании анализа открытых и закрытых пространств коворкингов, их функционального назначения, особенностей эксплуатации (режимов) и пространственно-планировочных решений проведено исследование взаимодействия и пересечения пространственных структур открытых и закрытых пространств между собой. Материалами исследования стали функционально-планировочные компоненты различных пространств коворкингов: целостность, взаимное расположение, функциональные связи, доминация пространств между собой.

Цель исследования – систематизация возможных типов связей открытых и закрытых пространств между собой.

В результате проведенного исследования сформулированы функционально-пространственные структуры коворкингов от открытого до закрытого типа, с переходными этапами между ними.

***Ключевые слова*:** коворкинг, открытое и закрытое пространство, пространственная структура

Для цитирования: Семенов С.И. Соотношение открытых и закрытых пространств в коворкингах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 110–117. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-110-117. EDN: GYQTSF

© Семенов С.И., 2025

ORIGINAL ARTICLE

RATIO BETWEEN OPEN AND ENCLOSED SPACE IN CO-WORKING SPACE

Svyatoslav I. Semenov
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract. Co-working space combines open and enclosed spaces in which various activities of residents are carried out. Open and enclosed co-workings influence the formation of the environment and conditions for a certain activity (each activity has its own space). Today, the ratio between open and enclosed spaces is relevant in terms of spatial solutions (open and enclosed spaces) and affect the efficiency of the economic activity of people. Based on the analysis of open and enclosed co-working spaces, their functional purpose, operation and spatial planning solutions, this paper studies the interaction and intersection of spatial structures of open and enclosed spaces. The study includes planning components of various co-working spaces: integrity, mutual arrangement, functional connections, dominance. The analysis of these components is the basis of systematization of possible connections between open and enclosed spaces. Functional-spatial structures of open and enclosed co-workings are presented together with transitional stages between them.

Purpose: The aim of the work is to systematize the types of connections of open and closed spaces with each other.

Research findings: Functional-spatial structures are proposed for co-working spaces from open to closed type with transitional stages between them.

***Keywords*:** co-working, open and enclosed spaces, spatial structure

For citation: Semenov S.I. Ratio between Open and Enclosed Space in Co-Working Space. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 110–117. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-110-117. EDN: GYQTSF

Введение

Понятия «открытое» и «закрытое» по своему значению противоположны. Это справедливо и для открытых и закрытых пространств – каждое имеет свои характеристики, предназначено для определенной деятельности и по факту взаимоисключает и предопределяет друг друга (исходя из принципа поляризации) [1]. Коворкинги как место, ориентированное на экономическую деятельность, активно исследуются с финансовой точки зрения: рентабельность, эффективность, срок окупаемости, конкурентоспособность. Исследования по этой теме представлены во многих зарубежных журналах по бизнесу и экономике [2, 3, 4], а также электронных журналах, специализирующихся на сборе и анализе данных о коворкингах (электронный журнал DESKMAG [5, 6, 7]). При этом влиянию пространственных решений (их связям и отношениям) на деятельность уделяется недостаточно внимания, притом что пространства в коворкингах – это главный инструмент создания среды и условий для эффективной экономической (производственной) деятельности резидентов. И на сегодняшний день одним из нерешенных и актуальных планировочных вопросов является соотношение закрытых и открытых пространств. Данный вопрос в рамках настоящего исследования решался, во-первых, с точки зрения необходимости создания для каждого

вида деятельности соответствующего пространства (для одной деятельности – открытое, для другой – закрытое, а значит, необходимы оба одновременно), а во-вторых, с точки зрения взаимодействия и пересечения пространств (открытых и закрытых), противоположных по существу друг другу.

Материалы и методы исследования

Открытые пространства предназначены для всех резидентов коворкинга (в рамках режима его функционирования) в равной степени. Например, в open space коворкингов рабочие места редко закреплены за конкретным человеком («горячие столы»), поэтому занимаются по факту доступности (пришел – выбрал свободное рабочее место – работаешь). Кухня доступна каждому в удобное для него время (кто-то обедает в двенадцать часов, кто-то в пятнадцать часов). Комната отдыха функционирует по тому же принципу (если есть место, то можно воспользоваться). Разумеется, если все места заняты, то из соображений вежливости можно прийти в другое время [5].

Закрытые пространства доступны для всех резидентов коворкингов только в установленное время и при определенных условиях. Например, некоторые тарифы на посещение коворкинга имеют ограничения на использование отдельных пространств или же использование пространств лишь в определенное время и определенной продолжительностью (1 час в неделю, или 2 раза в месяц). Рабочие комнаты (мини-офис) на двух, трех и более человек (в зависимости от площади) арендуются непосредственно для этих работников, и доступ в такие помещения другим работникам не предусмотрен. Комнаты для переговоров и совещаний могут использоваться по принципу: если свободно, то можно использовать, однако чаще такие помещения используются по графику и согласно тарифам посещения коворкингов. Комнаты для семинаров и конференц-залы используются аналогично переговорным, однако срок их бронирования значительно больше (от нескольких часов до нескольких дней) [5, 8, 9, 10].

Из представленных примеров видно, что открытые и закрытые пространства имеют разное назначение, это подтверждает приведенное в начале статьи утверждение о том, что открытые и закрытые пространства имеют свои отличные характеристики и предназначены для определенной деятельности.

Каждое из пространств способно закрыть лишь часть потребностей резидентов коворкингов. При этом, исходя из определения, что «коворкинг – это нацеленное на совместное использование ресурсов гибкое рабочее пространство для сообщества независимых профессионалов с расширенными потребностями в отношении трудовой, интеллектуальной и социальной деятельности» [11, с. 355], очевидно, что этих потребностей очень много и они в большинстве своем противоречат друг другу. Поэтому требуются различные пространственные решения [12]: для одних задач – открытые, для других – закрытые пространства.

Для полноты изложения материалов исследования необходимо отметить, что существуют коворкинги, в которых есть только открытые или только закрытые пространства (такие коворкинги можно отнести к исключениям из правила, в большинстве коворкингов существуют оба типа пространств). Данные обстоятельства не следует считать причиной исключения таких пространств из типологии коворкингов, и необходимо лишь понимать, что такое

пространственное решение ограничивает деятельные возможности резидентов коворкингов.

Таким образом, можно сделать вывод, что одновременное существование разных пространств необходимо для создания условий для полноценной деятельности резидентов коворкингов. В таких условиях и возникает необходимость в решении вопроса о соотношении открытых и закрытых пространств в коворкингах, их взаимодействии, взаиморасположении и взаимозависимости.

Результаты исследования

Соотношение открытых и закрытых пространств можно провести по нескольким признакам, например, по доминации одной из полярностей [1]: открытый или закрытый коворкинг.

Другим критерием соотношения можно принять целостность и расположение пространств (открытых или закрытых) в каждом типе коворкинга. Например, пространство (открытое или закрытое) может быть единым, большим, с совмещением всех функций в одном месте. Пространств разного или одинакового размера может быть несколько: расположенные рядом, распределенные по всему коворкингу и имеющие одну или разные функции, сгруппированные по функциям. Например: рабочие комнаты (на два и более резидента) могут быть центральным ядром, к которому примыкают переговорные и помещения для семинаров, или несколько рабочих комнат с примыкающими к ним переговорными будут повторяться в пространстве коворкинга как стандартный модуль. Открытое пространство может также решаться разнообразно, например, может включать в себя не только рабочие места, но и точку кофе-брейка, зону отдыха или физической активности. Открытое пространство может быть фрагментировано: рабочий open space в одном месте, кухня (место приема пищи) – в другом, рекреации и зоны отдыха – в следующем (их может быть несколько или по одному) [5]. Исходя из вышеописанного, можно заключить, что пространство (открытое или закрытое) может быть единым или разделено на несколько частей, сгруппированным по единой функции или состоять из зон с разными функциями.

Следующими критериями соотношения необходимо принять доминацию, целостность и расположение пространств (открытых или закрытых) относительно друг друга. На данном этапе происходит взаимодействие и пересечение пространственных структур – открытых и закрытых пространств между собой, в результате чего непосредственно и рождаются коворкинги с разными функционально-пространственными структурами: от открытого до закрытого типа, с переходными структурами между ними.

Открытый коворкинг – тип А.1 (рис. 1, *а*). Открытое пространство доминирует, единое ядро (моно- или полицентрично) с совмещением в себе всех функций, закрытые пространства примыкают и дополняют ядро.

Открытый коворкинг – тип А.2 (рис. 1, *б*). Открытое пространство доминирует, единое ядро (моно- или полицентрично) с фрагментацией, при которой часть открытых пространств отделена от ядра (часть функций вынесена), закрытые пространства примыкают и дополняют ядро или распределены по пространству коворкинга.

Открыто-закрытый коворкинг – тип А.3 (рис. 1, *в*). Открытое пространство доминирует, фрагментировано, открытые и закрытые пространства с разными функциями распределены по пространству коворкинга.

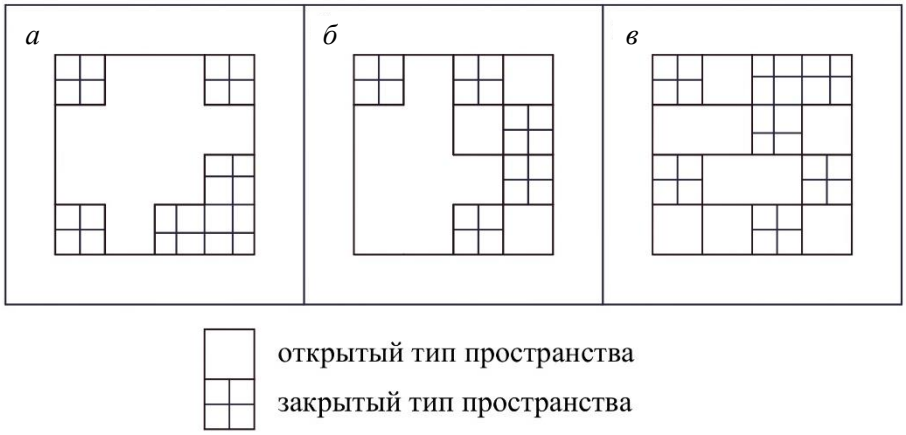


Рис. 1. Открытые функционально-пространственные структуры коворкингов:
а – открытый коворкинг – тип А.1; *б* – открытый коворкинг – тип А.2; *в* – открыто-закрытый коворкинг – тип А.3

Fig. 1. Open functional-spatial structures of co-workings:
a – open type A.1; *b* – open type A.2; *c* – open-enclosed type A.3

Закрытый коворкинг – тип Б.1 (рис. 2, *а*). Закрытое пространство доминирует, единое ядро (моно- или полицентрично) с совмещением в себе всех функций, открытые пространства примыкают и дополняют ядро.

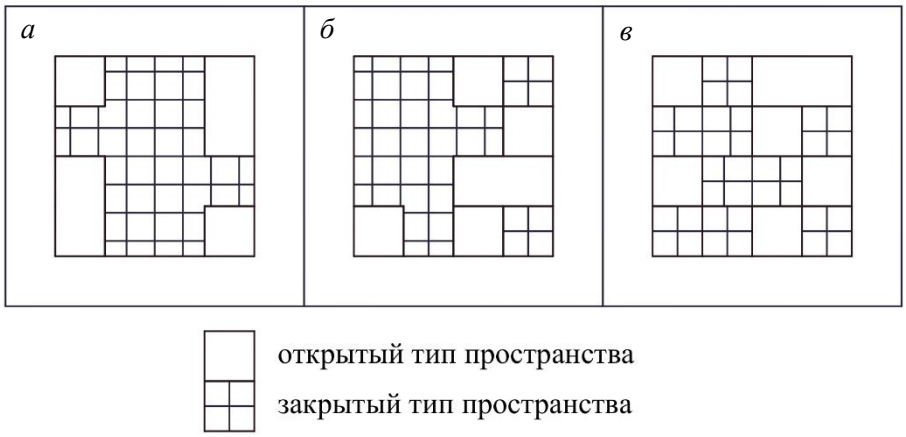


Рис. 2. Закрытые функционально-пространственные структуры коворкингов:
а – закрытый коворкинг – тип Б.1; *б* – закрытый коворкинг – тип Б.2; *в* – закрыто-открытый коворкинг – тип Б.3

Fig. 2. Enclosed functional-spatial structures of co-workings:
a – closed type B.1; *b* – closed type B.2; *c* – enclosed-open type B.3

Закрытый коворкинг – тип Б.2 (рис. 2, *б*). Закрытое пространство доминирует, единое ядро (моно- или полицентрично) с фрагментацией, при которой часть закрытых пространств отделена от ядра (часть функций вынесена), открытые пространства примыкают и дополняют ядро или распределены по пространству коворкинга.

Закрыто-открытый коворкинг – тип Б.3 (рис. 2, *в*). Закрытое пространство доминирует, фрагментировано, закрытые и открытые пространства с разными функциями распределены по пространству коворкинга.

Следующей структурой (равноудаленной от открытой и закрытой) является структура без доминации одного из типов пространств (рис. 3).

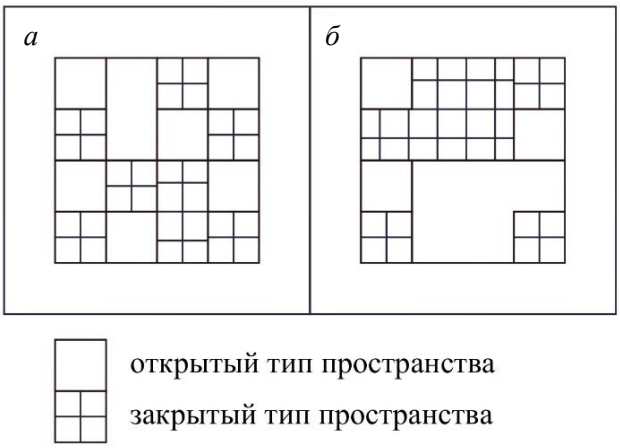


Рис. 3. Функционально-пространственные структуры коворкингов без доминации одного из типов пространств:
а – пространства фрагментированы и распределены по коворкингу – тип В.1; *б* – два центра – тип В.2

Fig. 3. Functional and spatial structures of co-workings without any dominance:
a – spaces are fragmented and distributed across the coworking space – type C.1; *b* – two centers – type C.2

Открытые и закрытые пространства фрагментированы и распределены по пространству коворкинга – тип В.1 (рис. 3, *а*), или существуют два центра (открытый и закрытый) – тип В.2 (рис. 3, *б*), вокруг которых открытые и закрытые пространства с разными функциями примыкают к ядру и распределены по пространству коворкинга.

Заключение

Коворкинги появились в ответ на возросшие требования к пространству для трудовой, интеллектуальной и социальной деятельности людей. Для каждого вида деятельности необходимо свое пространственное решение, нужны определенные условия для её оптимального и эффективного осуществления. Это означает, что пространства с различными параметрами – необходимость для коворкингов, и вопрос их соотношения и взаимодействия возникает по факту, как следствие потребности работников в открытых и закрытых про-

странствах. В результате того, что в рамках пространств (открытых и закрытых) существует своя внутренняя иерархия и различные комбинации, при их взаимодействии и пересечении между собой формируются более сложные, многообразные и вариативные пространственные структуры, производными которых являются различные по функции и геометрическим характеристикам открытые и закрытые зоны.

Пространства в коворкингах – это главный инструмент создания среды и условий для эффективной экономической (производственной) деятельности резидентов, и этот инструмент необходимо знать и уметь осознанно и грамотно применять при проектировании объемно-пространственных решений коворкингов. Исходя из этого, можно констатировать, что понимание отношений открытых и закрытых пространств между собой является необходимым при проектировании коворкингов.

Список источников

1. *Зеленов Л.А.* Собрание сочинений. В 4 томах. Том 3. Антропономия. Нижний Новгород : Изд-во Гладкова, 2006. 244 с. ISBN 5-93530-179-2.
2. *Spinuzzi C.* Working Alone Together. Coworking as Emergent Collaborative Activity // Journal of Business and Technical Communication. 2012. № 26 (4). P. 399–441. DOI:10.1177/1050651912444070
3. *Waters-Lynch J., Potts J., Butcher T., Dodson J., Hurley J.* Coworking: A Transdisciplinary Overview // SSRN Electronic Journal. 2016. P. 1–58. DOI: 10.2139/ssrn.2712217
4. *Spinuzzi C., Bodrozic Z., Scaratti G., Ivaldi S.* Coworking Is About Community: But What Is “Community” in Coworking? // Journal of Business and Technical Communication. 2018. № 33 (2). P. 112–140. DOI: 10.1177/1050651918816357
5. *Deskmag*. URL: https://www.deskmag.com/en/ (дата обращения: 04.12.2024).
6. *Global Coworking Survey*. URL: https://www.globalcoworkingsurvey.com/ (дата обращения: 04.12.2024).
7. *Deskmag Coworking Statistics*. URL: https://coworkingstatistics.com/general-coworking-statistics-free (дата обращения: 04.12.2024).
8. *Pricing at The Old Church School*. URL: https://www.theoldchurchschool.co.uk/pricing/ (дата обращения: 04.12.2024).
9. *Mindspace*. Meeting Rooms. URL: https://partners.flexspace.ai/offerings/mindspace-meeting-rooms (дата обращения: 04.12.2024).
10. *Океанис коворкинг*. URL: https://oceanis-cowork.ru/ (дата обращения: 04.12.2024).
11. *Семенов С.И.* История трансформации значения термина «коворкинг» // XIV Всероссийский Фестиваль науки : сборник тезисов, Нижний Новгород, 24–26 ноября 2024 г. Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. С. 354–355.
12. *Зинина С.М., Семенов С.И.* Психологические закономерности общения, учитываемые при проектировании коворкингов // XII Всероссийский Фестиваль науки : сборник докладов, Нижний Новгород, 18–19 октября 2022 г. Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 544–548.

References

1. *Zelenov L.A.* Collected Works, in 4 vol. Vol. 3. Anthroponomy. Nizhny Novgorod, 2006. 244 p. ISBN 5-93530-179-2. (In Russian)
2. *Spinuzzi C.* Working Alone Together. Coworking as Emergent Collaborative Activity. *Journal of Business and Technical Communication*. 2012; 26 (4): 399–441. DOI: 10.1177/1050651912444070
3. *Waters-Lynch J., Potts J., Butcher T., Dodson J., Hurley J.* Coworking: A Transdisciplinary Overview. *SSRN Electronic Journal*. 2016; 1–58. DOI: 10.2139/ssrn.2712217

4. *Spinuzzi C., Bodrozic Z., Scaratti G., Ivaldi S.* Coworking is About Community: But What is “Community” in Coworking? *Journal of Business and Technical Communication*. 2018; 33 (2): 112–140. DOI: 10.1177/1050651918816357
5. Deskmag. Available: www.deskmag.com/en/ (accessed December 4, 2024).
6. Global Coworking Survey. Available: www.globalcoworkingsurvey.com/ (accessed December 4, 2024).
7. Deskmag coworking statistics. Available: https://coworkingstatistics.com/general-coworking-statistics-free (accessed December 4, 2024).
8. Pricing at the old church school. Available: www.theoldchurchschool.co.uk/pricing/ (accessed December 4, 2024).
9. Mindspace. Meeting rooms. Available: https://partners.flexspace.ai/offerings/mindspace-meeting-rooms (accessed December 4, 2024).
10. Oceanis coworking. Available: https://oceanis-cowork.ru/ (accessed December 4, 2024).
11. *Semenov S.I.* History of Transformation of the Term Coworking. In: *Proc. 14th All-Russ. Festival of Science*, November 24–26. Nizhny Novgorod, 2024. Pp. 434–435. (In Russian)
12. *Zinina S.M., Semenov S.I.* Psychological Patterns of Communication in Coworking Space Design. In: *Proc. 12th All-Russ. Festival of Science*, October 18–19, Nizhny Novgorod, 2022. Pp. 544–548. (In Russian)

Сведения об авторе

Семенов Святослав Игоревич, аспирант, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, architectorsvsemenov@yandex.ru

Author Details

Svyatoslav I. Semenov, Research Assistant, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Ilyinskaya Str., 603000, Nizhniy Novgorod, Russia, architectorsvsemenov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 05.12.2024
Одобрена после рецензирования 18.01.2025
Принята к публикации 20.01.2025

Submitted for publication 05.12.2024
Approved after review 18.01.2025
Accepted for publication 20.01.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 118–131.

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 (1): 118–131.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 711.4
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-118-131 EDN: JPZHPP

ЭВОЛЮЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ГОРОДСКИХ УЛИЦ СИБИРСКОГО РЕГИОНА (XVII – НАЧАЛО XX В.)

Дмитрий Викторович Карелин, Мария Сергеевна Тырышкина
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Развитие городских территорий тесно связано с адаптацией и сопряжением естественных ландшафтов и хозяйственной деятельности. Исследование эволюции инженерного благоустройства сибирских городов позволяет выявить хронологические зависимости между функциональными и эстетическими качествами урбанизированных пространств часто инженерно не подготовленных территорий.

Цель. Выявить основные этапы эволюции инженерного благоустройства городских улиц Сибирского региона XVII – начала XX в. на примере трех городов Западной Сибири: Омска, Томска, Бийска. Проведен хронологический анализ развития группы городов от момента их основания и до событий Первой мировой войны и последующей Революции 1917 г.

Материалы и методы. Использованы комплексный и графоаналитический подходы, систематизация архивных источников и картографического материала.

Результаты и выводы. Установлены основные направления развития рассматриваемой группы городов и факторы, влияющие на расширение городских территорий и увеличение численности населения. Определены ключевые этапы развития инженерного благоустройства. Выявлены главные улицы с комплексным благоустройством, рассмотрены мероприятия по мелиорации земель в условиях слабых грунтов.

Ключевые слова: инженерное благоустройство, Сибирский регион, мощение улиц, мелиорация земель, уличное освещение, инженерные коммуникации, озеленение территорий

Для цитирования: Карелин Д.В., Тырышкина М.С. Эволюция инженерного благоустройства городских улиц Сибирского региона (XVII – начало XX в.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 118–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-118-131. EDN: JPZHPP

© Карелин Д.В., Тырышкина М.С., 2025

ORIGINAL ARTICLE

EVOLUTION OF ENGINEERING IMPROVEMENT OF URBAN STREETS IN THE SIBERIAN REGION IN THE 17th AND EARLY 20th CENTURIES

Dmitrii V. Karelin, Mariya S. Tyryshkina
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia

Abstract. *Purpose:* Identification of the evolution stages of engineering improvement of urban streets in the Siberian region in the 17th and early 20th centuries, namely in Omsk, Tomsk, Biysk regions.

Methodology: The chronological analysis of the development of cities starting from their foundation up to the events of the World War I and the subsequent Revolution in 1917. Comprehensive and analytical approaches, systematization of archival document and cartographic materials.

Research findings: The main development trends of cities, factors that influence the expansion of urban areas, and the increase in population are identified. The key stages of engineering improvement development are defined. The main streets subjected to comprehensive improvement are identified, land reclamation measures in the conditions of weak soils are considered.

Keywords: engineering landscaping, Siberian region, street paving, land reclamation, street lighting, engineering communications

For citation: Karelin D.V., Tyryshkina M.S. Evolution of Engineering Improvement of Urban Streets in the Siberian Region in the 17th and Early 20th Centuries. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 118–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-118-131. EDN: JPZHPP

Введение

Эволюция инженерного благоустройства охватывает длительный исторический период. Укрупненно развитие инфраструктуры поселений можно разделить на следующие этапы:

1. Древние цивилизации (Древний Египет, Месопотамия, Древний Рим) до V в. Разрабатывались сложные разветвленные системы каналов для орошения полей и защиты от наводнений. В Древнем Риме созданы первые масштабные инженерные сооружения в виде системы акведуков для доставки пресной воды в города [1]. Материалом для мощения улиц являлись глина, камень, плиты из туфа и базальта, укладываемые в сложные узоры, что представляет собой первые признаки визуального благоустройства [2].

2. Средние века с V по XIV в. Улицы в городах часто оставались неблагоустроенными, мостовых было мало. В основном использовались гравий и земля, что приводило к образованию пыли и грязи [Там же].

3. Ренессанс и эпоха Просвещения XIV–XVIII вв. Появление первых научных подходов к организации городской инфраструктуры с учетом функциональности территории и эстетических свойств. В некоторых европейских городах начали появляться тротуары, что улучшало условия для пешеходов. В Российской империи начинается активное развитие городов, строятся транспортные коммуникации, крепости и укрепления, предпринимаются попытки

создания водопроводов (г. Санкт-Петербург, Москва), вводятся первые санитарные нормы [3].

4. XVIII – начало XIX в. Массовое строительство промышленных зданий, сооружений и их комплексов и развитие железной дороги увеличило поток транспорта, за счет чего появилась необходимость в укрепленных мощениях. В конце XVIII в. впервые материалом для мощения улиц стал асфальт, что обеспечило прочность и долговечность дорожного покрытия. Начали появляться современные системы очистки сточных вод.

5. Конец XIX – начало XX в. Утверждение первых градостроительных норм [4], стандартов, проектирование улиц с учетом транспортных (личного и общественного транспорта) и пешеходных потоков.

Для каждого исторического этапа характерны свои отличительные черты, к примеру, к началу XX в. активно возрастает уровень благоустройства и озеленения территории, проводится ряд мероприятий в разных городах: устанавливается уличное освещение, увеличивается количество зеленых насаждений. Однако в связи с началом Первой мировой войны (1914–1918 гг.) и Революции 1917 г. развитие сферы благоустройства останавливается.

Инженерное благоустройство территории включает в себя комплекс мероприятий, направленных на создание и улучшение инфраструктуры города. К инженерному благоустройству относится: прокладка коммуникаций (водопроводов, бытовой и ливневой канализации, газопроводов, сетей электроснабжения), строительство и ремонт автомобильных дорог и парковок, тротуаров, установка уличного освещения, озеленение территорий, создание малых архитектурных форм, а также организация рельефа территории [5].

В связи с быстрым темпом развития городов, изменением темпов жизни актуальным становится модернизация принципов и подходов к организации инженерного благоустройства. Однако для выявления новых подходов необходимо проследить эволюцию формирования планировочной структуры города и инженерных преобразований. Города Сибирского федерального округа имеют свою уникальную структуру и особенности благоустройства. В статье рассмотрены:

1. Алтайский край (г. Бийск).
2. Томская область (г. Томск).
3. Омская область (г. Омск).

Ретроспектива развития благоустройства неразрывно связана с формированием системы требований к эксплуатации и обслуживанию городских территорий, а также со сменой парадигм технических укладов общества. Стоит отметить, что каждый город развивался и застраивался в разные годы, темпы строительства также отличались.

По мере развития научно-технического прогресса изменялись требования к инженерному благоустройству территорий, и в основном они соответствовали общим тенденциям градостроительства в стране, но при этом реализовывалась лишь малая часть. Именно развитие городского хозяйства и коммунальных инфраструктур определяло пространственную и социальную направленность градостроительства.

Результаты и обсуждение

Вторым по величине городом в Алтайском крае является Бийск. Изначально город был расположен на правом берегу р. Бии, вблизи слияния двух

рек (Катунь и Бия) [6, с. 303]. Исторически образован как Бикатунский острог в 1709 г. и только в 1783 г. учрежден городом.

К 1810 г. планировочная структура города формировалась из двух церквей, денежной кладовой, комендантского и офицерских домов, госпиталя, казарм, магазинов и жилых домов [Там же]. К 1860 г. Бийск насчитывал шесть улиц, состоящих преимущественно из деревянных домов, территория города практически не была благоустроена, отсутствовали также и культурные учреждения, а сам ритм жизни больше напоминал деревенский.

Почва города болотистая, за отсутствием мощений на улицах образовывались постоянные лужи, а в период проливных дождей дорожная сеть в целом была размыта [7].

Таким образом, на основании сохранившихся исторических данных можно заключить, что на начальном этапе развития г. Бийск по численности населения и застройки активно развивался, однако структура и темпы благоустройства территории оставались на низком уровне.

В 80-е гг. XIX в. проводятся первые мероприятия по мелиорации земель: осушение болот, строительство двух канав к р. Бии, обустройство рва на площади вблизи городского училища. В 1879 г. выходит постановление об обязательном устройстве канав жителями города, где каждый напротив своего дома/усадьбы должен был провести канаву для отвода стоков [8].

Одной из основных причин замедленного развития благоустройства была нехватка государственных средств. К концу XIX в. было организовано уличное освещение ул. Барнаульской (ныне ул. Кирова), как основной магистрали города, для укрепления слабых грунтов и осушения территорий высаживались деревья [Там же].

Следующим этапом развития городского хозяйства можно считать 90-е гг. XIX – начало XX в. В эти годы начинается прокладка Транссибирской магистрали и введение Городового положения (1892 г.).

В начале XX в. городской бюджет увеличивается практически в 6 раз, что позволяет начать строительство общественных/промышленных зданий и частных домов. В 1902 г. устанавливается телефонная сеть, однако строительство водопровода, канализации и трамвайных линий в досоветское время так и не было реализовано.

Застройка города к началу событий 1914 г. предъявляла минимальные требования к благоустройству и озеленению внутриквартальных и придомовых территорий. Так, для мощения улиц использовался фашинный материал (прутья), а для освещения улиц применялись главным образом керосиновые фонари. Стоит отметить, что благоустройство городских территорий в те годы проводилось не всегда за счет городских средств, часто на средства застройщиков и благотворителей.

В XX в. активно началось расширение индустриального потенциала города, что обусловило потребность в создании новых инженерных систем и сооружений, организации рациональной улично-дорожной сети, строительстве моста через р. Бию и развитии новых транспортных коммуникаций.

Исходя из хронологии развития города и благоустройства в нем, допустимо предположить, что освоение земель происходило медленно, что было обусловлено высоким процентом заболоченных территорий и иными приори-

тетами городского бюджета. Улицы города долгое время не благоустраивались, и не проводилась их инженерная подготовка. Первые шаги к системной планировочной организации территории были предприняты к 80-м годам XIX в. На рис. 1 представлена схема эволюции инженерного благоустройства городских территорий Бийска в 1821 г. и начале XX в.

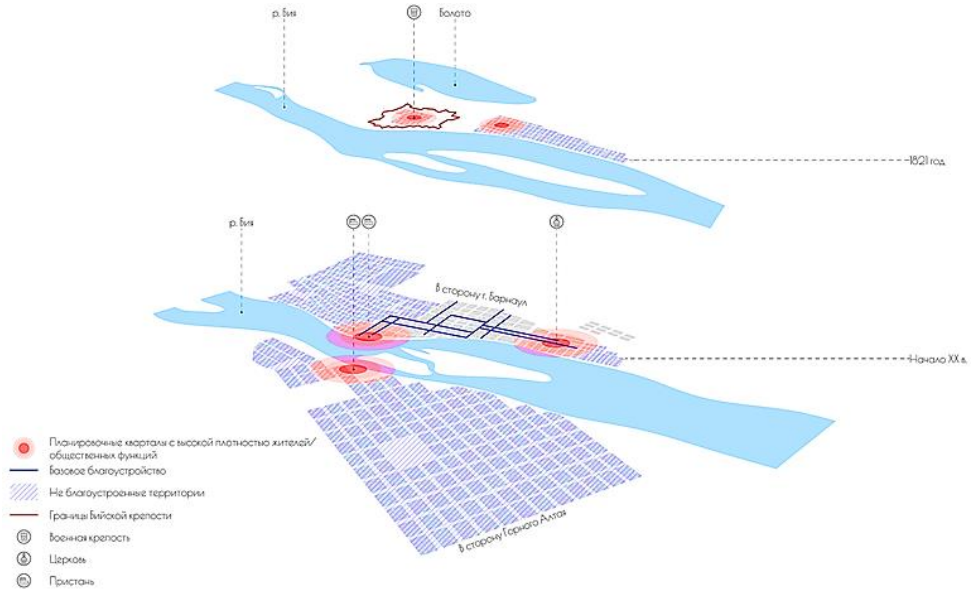


Рис. 1. Эволюция инженерного благоустройства городских территорий в г. Бийске в 1821 г. и начале XX в.

Fig. 1. Evolution of engineering improvement of urban areas in Biysk in 1821 and early 20th century

Одним из первых образованных в Сибири городов считается Томск, расположенный на юге Западной Сибири на берегу р. Томи. Сейчас г. Томск является крупным образовательным, научным и инновационным центром. С указом царя в сентябре 1604 г. была образована Томская крепость как главный опорный пункт в продвижении вглубь Сибири и градостроительное ядро города [9, с. 18].

В 1629 г. Томская крепость стала центром области и расширила свои границы за счет торгово-ремесленного посада по всему периметру крепости и двух острогов: верхнего и нижнего. Строительство раннего Томска не регулировалось: новая застройка вплотную пристраивалась к старой [10, с. 33]. Поскольку большинство домов возводилось в основном из дерева, компактность города была опасна при пожарах, так, в 1639 г. сгорела большая часть верхнего острога, а в 1643 г. – практически весь город. С 1647 по 1648 г. городские здания и сооружения были капитально отремонтированы и возведены заново [Там же]. Первоначально улицы были грунтовыми, что создавало трудности в передвижении в дождливую погоду. С развитием города и увеличением пешеходного и транспортного потоков возникла необходимость в более надежном покрытии. Первым материалом для мощения улиц стали деревянные плиты, распространенные на тот период во многих городах царской России.

Посады Томска развивались неравномерно, к концу XVII в. преобладающим по застройке стал нижний, однако крепость всё так же являлась градостроительным ядром, основные административные здания располагались по периметру крепости, образуя площадь. Жилые дома возводились на некотором расстоянии от основных построек и образовывали улицу в два ряда домов от проездной башни в северной части крепости до церкви первого Успенского собора.

На рубеже XVII–XVIII вв. восточные границы России приняли современное очертание (с незначительными изменениями в настоящее время), что привело к утрате Томском оборонительных функций и преобразованию его в административно-торговый центр Томского разряда (области). Стоит отметить, что улично-дорожная сеть (УДС) города формировалась в соответствии с движением талых вод на основе естественного водоотведения. Почва Томской области преимущественно представлена суглинками, для которых характерна текучесть при насыщении влагой, поэтому такой принцип организации УДС был наиболее рациональным.

В 1730 г. началось строительство Сибирского тракта – главного маршрута от европейской части России до границы с Китаем, который проходил и через г. Томск. Город начал быстро приобретать характерные черты крупного торгово-ремесленного центра. В начале XVIII в. появляется новый тип планировки города – регулярный, вместе с этим формируется перечень требований к благоустройству: санация поврежденных древесно-кустарниковых насаждений и организация новой высадки, мощение улиц камнем, установка фонарей, устройство городского водопровода и канализации. В это же время в архитектурном облике города появляются первые каменные постройки [11].

Тем не менее к 70-м гг. XVIII в. Томск остается хаотично застроенным. Согласно путевым запискам П.С. Палласа, к 1770 г. (после пожара) жителям предписывалось соблюдать новые границы улиц при строительстве. В нижней части города отсутствие мощеных дорог приводило к размывам, что затрудняло движение гужевого транспорта [12].

В 1804 г. была образована Томская губерния, а г. Томск получил статус ее столицы. Формируются новые требования к застройке города, его архитектурно-художественному облику, а также благоустройству улиц. В первой половине XIX в. организовывается частичное мощение улиц булыжником (в основном центральной части), а также укладка деревянных тротуаров. В 1830 г. утверждается генеральный план города, согласно которому осуществлялась дальнейшая застройка.

В 1832 г. появляется первое уличное освещение, монтируются керосиновые фонари вдоль въезда в город с западной стороны и на выезде по Иркутскому тракту. В 70-х гг. XIX в. предприняты попытки создания централизованных систем водоснабжения и водоотведения для улучшения санитарного состояния города. Основной задачей благоустройства в этот период было осушение городских территорий, которые находились на болотистых и затопляемых во время паводков землях. Появляются первые проекты по организации рельефа, устраиваются дренажные канавы.

К концу XIX в. активно растет численность населения, открывается Томский университет, город превращается в культурный и научный центр Сибири

(позднее город приобрел неофициальное название «Сибирские Афины»). Проводится также озеленение вдоль тротуаров, создаются сады, парки, скверы. Главные улицы города оснащаются искусственным освещением, масштабная электрификация приходится на рубеж XIX–XX вв. С ростом числа жителей и развитием торговли мощение улиц становится важным элементом городской планировки. На главных улицах устраиваются деревянные мостовые для пешеходов (настилы и тротуары), проезжая часть засыпается гравием.

В начале XX в. модернизируется система водоснабжения, увеличивается количество электрического освещения, центральные улицы комплексно покрываются брусчаткой, благоустраиваются сады, парки и бульвары, начинает функционировать телеграфная и телефонная связь. Стоит отметить, что на данном этапе мощение не только снижает уровень загрязнения и повышает комфорт передвижения, но и становится важным элементом в визуальном благоустройстве улиц города.

К началу XX в. были благоустроены центральные районы: Уржатка (от ул. Источной до ул. Тверской и от ул. Беленца до ул. Герцена), Пески (от ул. Набережная р. Томи до ул. Большой Подгорной и от ул. Дальне-Ключевской до пл. Ленина) и Базарная площадь (от ул. Набережная р. Томи до пр. Ленина и от ул. Ленина до ул. Набережная р. Ушайки) [13]. В процессе развития города как научного центра Сибири большое внимание было уделено ул. Большой Садовой (ныне пр. Ленина), на которой располагались основные здания университетов.

По сравнению с г. Бийском развитие инженерного благоустройства в г. Томске происходило более активно. Таким образом, возникший как крепость, к XIX в. город приобретает характерные черты культурного и научного центра, вектор развития которого направлен на создание комфортной городской среды. На рис. 2 представлена схема эволюции инженерного благоустройства городских территорий г. Томска в начале XVII в., 1872 г. и 1911 г.

Административным центром Омской области является г. Омск, расположенный на слиянии двух рек: Иртыша и Оми. Как и г. Томск, Омск образован как крепость в 1716 г. на южном берегу р. Оми. По форме крепость имела вид правильного пятиугольника, обнесенного палисадом.

В 1740-х гг. за крепостью находилось четыре слободы (форштадт). Омская крепость практически не подвергалась нападениям и являлась основным Сибирским узловым пунктом оборонительных линий из Оренбурга, Тобольска и Ямышева. К 70-м гг. XVIII в. крепость не удовлетворяла военным требованиям и имела низкую обороноспособность, поэтому в 1768 г. началось строительство нового сооружения площадью более 30 га с четырьмя бастионами. К концу XVIII в. был сформирован архитектурный ансамбль вокруг крепостного плаца. Первым строением из камня стал Воскресенский военный собор.

В 1782 г. поселениям при крепости был присвоен статус города, который получил регулярный план [14]. Поскольку ядром служила крепость, город преимущественно развивался по радиально-кольцевой системе. В начале XIX в. г. Омск состоял из крепости и семи форштадтов (Казачий, Ильинский, Подгорный, Мокрый, Выползки, Бутырский и Кадышевский) [15]. В 1822 г. город становится административным центром Омской области, однако, не-

смотря на свой статус, по количеству и качеству застройки г. Омск значительно отставал от Тобольска и Томска. В 1840 г. он насчитывал три площади, 99 улиц и переулков [16, с. 51]. Как и в других городах Сибири, улицы оставались преимущественно грунтовыми, в проливные дожди бóльшая часть города становилась непроходимой для гужевого транспорта. К середине XIX в. г. Омск имел слабо развитию торговлю и промышленность, более половины населения по-прежнему составляли военные, что непосредственно влияло на уклад городской жизни.

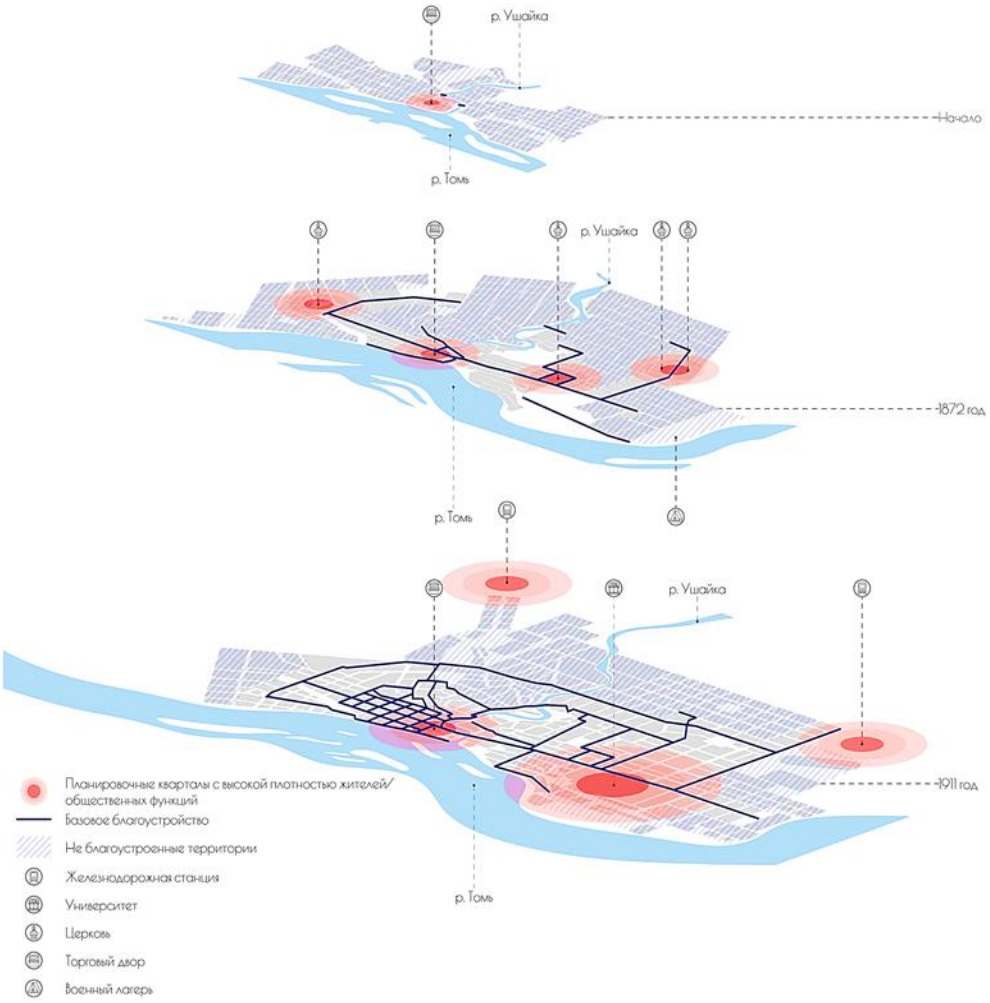


Рис. 2. Эволюция инженерного благоустройства городских территорий в г. Томске в начале XVII в., 1872 г. и 1911 г.

Fig. 2. Evolution of engineering improvement of urban areas in Tomsk early in the 12th century, 1872 and 1911

Город регулярно подвергался подтоплению, во время таяния снега во многих местах образовывались болота. Благоустройство Омска начинается

в 1840 г., появляются первые небольшие городские рощи, бульвары, а также вводится регулярная система освещения с использованием спиртово-скипидарных фонарей [16, с. 54]. В середине XIX в. проведены крупномасштабные мероприятия по высадке древесно-кустарниковых насаждений.

Из-за отсутствия мостовых и тротуаров летом улицы были покрыты пылью, весной и осенью – грязью, а зимой утопали в сугробах, поэтому с 60-х гг. XIX в. на центральных улицах появилось первое мощение из камня, булыжника и деревянной брусчатки. Однако к 70-м гг. XIX в. город по-прежнему сохранял черты сельской местности и значительно уступал не только Томску, но и уездным городам Тюмени и Барнаулу.

Система водоснабжения в городе также отсутствовала, воду набирали из рек и колодцев, более 70 % поднимаемой воды было непригодно для питья, поэтому она в основном использовалась для полива садов.

С 1882 г. Омск становится центром Степной губернии, а в 1894–1895 гг. – экономической столицей края благодаря строительству Транссибирской железнодорожной магистрали. Начинается промышленный подъем: строятся металлообрабатывающие заводы, предприятия по переработке сельскохозяйственного сырья, открываются магазины оптовой и розничной торговли [17].

На рубеже XIX–XX вв. центральная часть города застраивается общественными зданиями, доходными домами. Постепенно растет и бюджет города, за счет чего реализуются мероприятия, направленные на инженерное благоустройство. При подготовке к Первой сельскохозяйственной выставке, прошедшей в 1911 г., на Бульварной улице был проведен ряд мероприятий по посадке деревьев.

В начале XX в. в связи с ростом города и численностью его населения увеличивается и городской бюджет, выделяются средства на реализацию мероприятий по мощению улиц, строительству централизованного водоснабжения и электрификации, укреплению берегов р. Оми, устройству садов и парков. Стоит заметить, что за отсутствием местного камня (булыжника) процесс мощения улиц был замедлен. В марте 1912 г. начинается строительство Омского водопровода, который впоследствии обслуживал 80 % населения.

В 1914 г. был принят проект на строительство электрического освещения и трамвайных линий, однако в связи с началом Первой мировой войны и последующей за ней Революцией 1917 г. проект так и не удалось осуществить. В начале XX в. были комплексно благоустроены главные улицы города (направляющие развития): ул. Казнановская, пр. Чернавинский, ул. Дворцовая, ул. Атамановская (в настоящее время четыре улицы объединены в одну и носят название ул. Ленина), ул. Шпрингеровская (ул. Партизанская), ул. Аптечная и Артиллерийская (пр. Карла Маркса), ул. Тобольская (ул. Орджоникидзе), ул. Напцевичева (ул. Красный Путь), ул. Тарская (ул. Герцена), ул. Думская (в настоящее время название улицы не изменилось). На рис. 3 представлена схема эволюции инженерного благоустройства городских территорий г. Омска в 1782 г., 1879 г. и 1917 г.

На основе анализа рассмотренных исторических материалов можно сделать вывод, что темпы развития г. Омска были низкими.

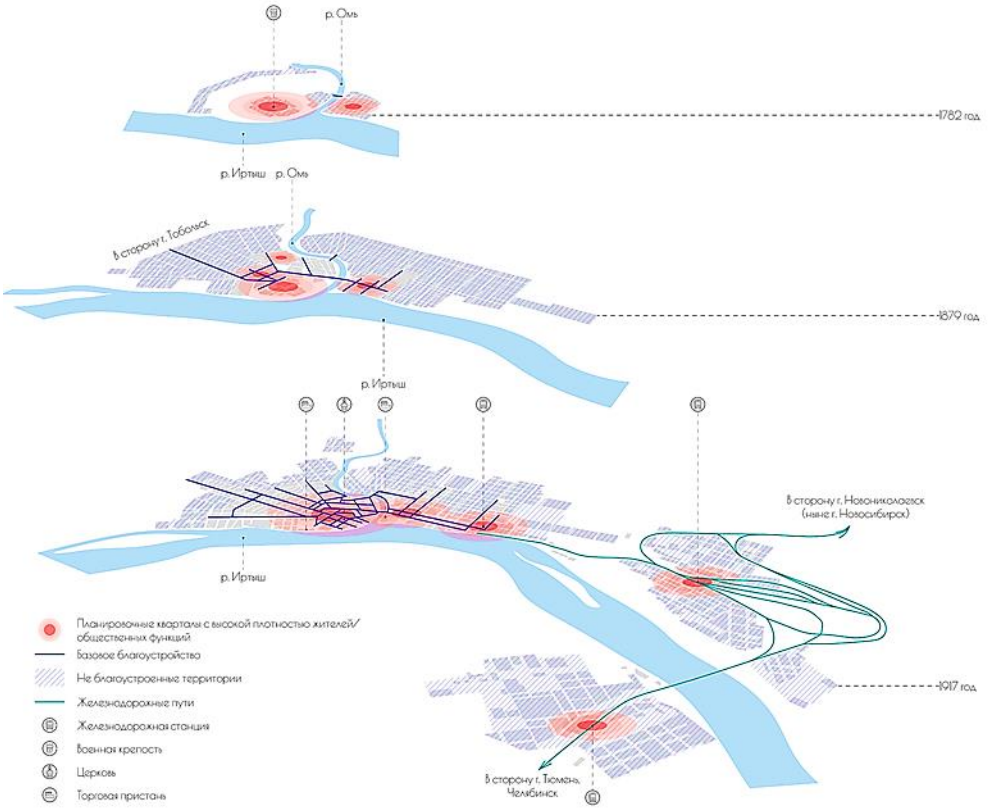


Рис. 3. Эволюция инженерного благоустройства городских территорий в г. Омске 1782 г., 1879 г. и 1917 г.

Fig. 3. Evolution of engineering improvement of urban areas in Omsk in 1782, 1879 and 1917

Наиболее активно организация застройки и инженерного благоустройства началась к началу XX в. В этот период город приобретает свой архитектурно-градостроительный облик, сохранившийся до настоящего времени, а также становится крупным промышленным и транспортным центром Сибири.

Выводы

Рассмотрев хронологию развития выбранной группы, можно выделить несколько временных этапов развития инженерного благоустройства сибирских городов:

I этап – конец XVII–XVIII в. Данный этап характеризуется основанием стратегически важных для освоения Сибири крепостей. Отличительными чертами этого времени являются отсутствие требований к благоустройству, нерегулярный план застройки, подтопление территорий, а впоследствии – затрудненность передвижения гужевого транспорта и пешеходных потоков.

II этап – начало – середина XIX в. На данном этапе предпринимаются начальные шаги по организации благоустройства территорий, направленные на улучшение качества жизни горожан. Осуществляются первые мероприятия по

мощению центральных улиц, так, в Томске и Омске на центральных улицах появляются первое освещение и частичное покрытие.

III этап – 1850–1880 гг. Отличительной особенностью данного этапа является массовое проведение мероприятий по мелиорации земель, преимущественно осушение территорий.

IV этап – рубеж XIX–XX вв. В этот период выполняется комплексное мощение центральной части городов, организовывается высадка новых древесно-кустарниковых насаждений, формируется система уличного освещения. Стоит отметить, что на развитие данного этапа значительно повлияли промышленная революция, для которой характерен массовый переход от ручного труда к машинному, и строительство Транссибирской железнодорожной магистрали. Так, в Омске увеличиваются объемы городского бюджета, возрастает количество уличного освещения, проводятся мероприятия по комплексному благоустройству и озеленению. В Томске предпринимаются первые шаги по созданию централизованных систем водоснабжения и водоотведения, что способствует росту уровня благоустройства городских территорий. В Бийске активно ведется строительство общественных зданий, появляются первые скверы и парки.

Начало XX в. Для этого периода характерно стремительное развитие инженерного благоустройства, появление новых подходов к организации территорий, создание первых градостроительных норм для регулирования застройки. Рассматриваемые города к началу XX в. комплексно благоустраиваются, повышается уровень жизни и комфорта граждан.

Необходимо также отметить, что в сибирских городах, в отличие от европейской части страны, плановые мероприятия, связанные с решением вопросов внешнего благоустройства, стали формироваться лишь в конце XVIII – начале XIX в., тогда как в г. Санкт-Петербурге комплексное благоустройство началось уже в 1710 г. Многие проекты, связанные с благоустройством городской среды, остались нереализованными вследствие начала Первой мировой войны и последовавшей за ней Революции 1917 г.

Исходя из анализа хронологических событий с XVII в. и до начала XX в. выявлены направления и факторы развития рассмотренной группы городов (рис. 4).

Наиболее активно развивался г. Томск как один из самых крупных культурных и научных центров в Сибири. Большое влияние на застройку города оказало строительство Транссибирской магистрали, как мощной сухопутной транспортной артерии России, и открытие Томского университета, за счет которых увеличился городской бюджет и соответственно уровень благоустройства территории.

Наиболее медленными темпами развивался г. Бийск. В ходе исторических событий город приобрел статус важного остановочного пункта на Чуйском тракте, который сегодня связывает такие города, как Новосибирск, Бердск, Новоалтайск, Бийск, Горно-Алтайск, и завершается в с. Ташанта (на границе с Монголией). Отметим, что государственный статус Чуйского тракта был закреплен только в 1922 г., ранее эта колесная дорога считалась северной веткой Великого шелкового пути, обеспечивавшего важные торговые поставки между Китаем, Монголией и Центральной Россией и Европой. Впоследствии через Чуйский тракт и его «нулевой километр» – г. Бийск – были налажены грузопотоки к Транссибирской магистрали.

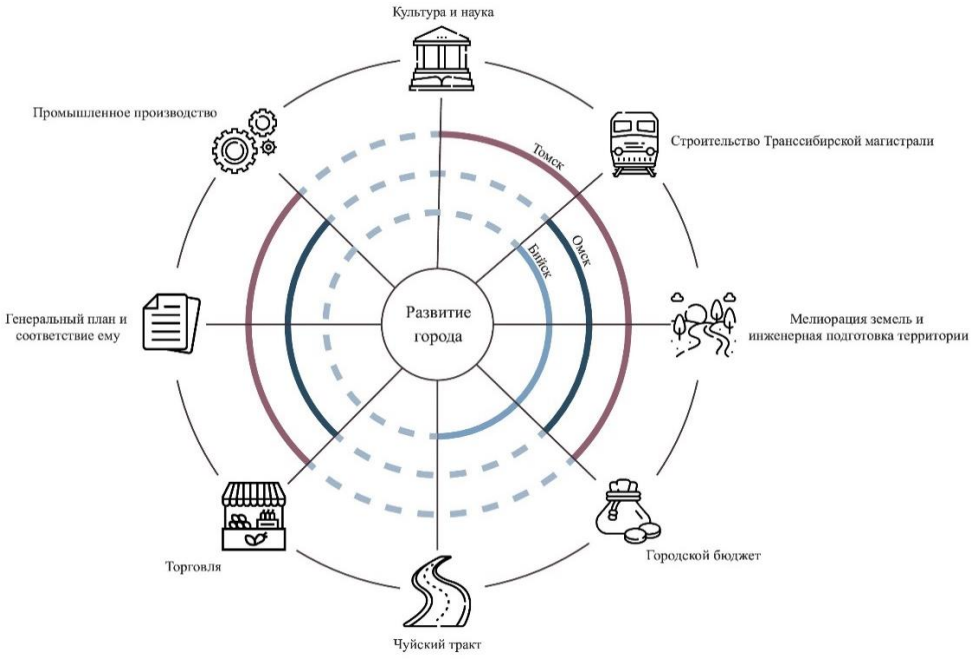


Рис. 4. Направления развития рассматриваемой группы городов
Fig. 4. Development trends in the considered group of cities

Образованный как военная крепость, г. Омск в пространстве исторических событий и промышленной революции приобрел характерные черты промышленного центра. Значимыми событиями для города и, соответственно, городского бюджета стали строительство Транссибирской магистрали и переход от ручного труда к машинному.

Список источников

1. *Зайцева И.С., Зайцева Н.А.* История развития водоснабжения и водоотведения. Кемерово : КузГТУ, 2011. 90 с. ISBN 978-5-89070-816-8.
2. *Бунин А.В.* История градостроительного искусства. Том I. Рабовладельческий строй. Феодализм. Капитализм. Москва : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1953. 531 с.
3. *Беляева Е.Л., Беляев А.Ю.* Об истории городского благоустройства и инженерных сетей Москвы. Часть I. История благоустройства Древней Москвы. XIV–XVII века // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 115–124. DOI:10.22337/2077-9038-2021-3-115-124
4. *Зиновьев А.Г.* История развития административного законодательства в сфере градостроительства // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2010. № 11. С. 213–221. EDN: NQUXOX
5. *Бакутис В.Э., Горохов В.А., Лунц Л.Б., Расторгуев О.С.* Инженерное благоустройство городских территорий. Москва : Стройиздат, 1979. 239 с.
6. *Баккаревич М.Н.* Статистическое обозрение Сибири. Санкт-Петербург : В типографии Шнора, 1810. 384 с.
7. *Алтай.* Историко-статистический сборник по вопросам экономического и гражданского развития Алтайского Горного округа / под ред. Н.А. Голубева. – Томск : Типо-Литография Михайлова и Макушина, 1890. 436 с.

8. *Гончаров Ю.М., Литягина А.В.* Очерки истории города Бийска (вторая половина XIX – начало XX в.). Барнаул : АлтГУ, 2009. 276 с. ISBN: 9785939573306.
9. *Томск* : история города в иллюстрациях, 1604–2004 : альбом / сост. Н.М. Дмитриенко. Томск : Изд-во Томского университета, 2004. 599 с. ISBN 5-7511-1782-4.
10. *Томск:* история города от основания до наших дней / под ред. Н.М. Дмитриенко. Томск : Изд-во Томского университета, 1999. 430 с. ISBN 5-7511-1020-X.
11. *Богданова О.В.* Архитектурный облик Томска. Томск : Красное знамя, 2005. 143 с. ISBN 5-9528-0032-7.
12. *Паллас П.С.* Путешествие по разным провинциям Российского государства. Санкт-Петербург : Печатано при Императорской Академии Наук, 1786. 571 с.
13. *Алисов Д.А.* Административные центры Западной Сибири : городская среда и социально-культурное развитие (1870–1914 гг.) : специальность 07.00.02 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора исторических наук / Алисов Дмитрий Андреевич. Омск, 2007. 42 с.
14. *Гудков А.А.* Регулярное градостроительство в Сибири в конце XVIII – первой половине XIX в. : специальность 18.00.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектура / Гудков Алексей Алексеевич. Москва, 1989. 26 с.
15. *Алисов Д.А.* Форштадты Омска (XIX – начало XX в.) // Известия Омского государственного историко-краеведческого музея. 1997. № 5. С. 27–34.
16. *Энциклопедия города Омска*. В 3 томах. Том 1. От прошлого к настоящему / под ред. Г.А. Павлова. Омск : ЛЕО, 2009. 249 с. ISBN 978-5-87821-152-9.
17. *История общественного самоуправления в Сибири* второй половины XIX – начала XX века / отв. ред. М.В. Шиловский. Новосибирск : ИД «Сова», 2006. 351 с. ISBN 5-87550-167-7.

References

1. *Zaitseva I.S., Zaitseva N.A.* The Development History of Water Supply and Sanitation. Kemerovo, 2011. 90 p. ISBN 978-5-89070-816-8. (In Russian)
2. *Bunin A.V.* The History of Urban Planning Art. Vol. I. The Slave-Owning System. Feudalism. Capitalism. Moscow, 1953. 531 p. (In Russian)
3. *Belyaeva E.L., Belyaev A.Y.* On the History of Urban Improvement and Engineering Networks in Moscow. Part I. The History of Improvement of Ancient Moscow in the 14–17th centuries. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2021; (3): 115–124. (In Russian)
4. *Zinoviev A.G.* The History of Development of Administrative Legislation in Urban Planning. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2010; (11): 213–221. EDN: NQUXOX (In Russian).
5. *Bakutis V.E., Gorokhov V.A., Lunts L.B., Rastorguev O.S.* Engineering Improvement of Urban Areas. Moscow: Stroyizdat, 1979. 239 p. (In Russian)
6. *Bakkarevich M.N.* Statistical Review of Siberia. Saint-Petersburg, 1810. 384 p. (In Russian)
7. *Golubev N.A. (Ed.)* Altai. In: Historical and Statistical Collection on Economic and Civil Development of the Altai Mountain District. Tomsk: Typo-Lithography of Mikhailov and Makushin, 1890. 436 p. (In Russian)
8. *Goncharov Yu.M., Lityagina A.V.* Essays on the History of the City of Biysk (19–20th centuries). Barnaul, 2009. 276 p. (In Russian)
9. *Dmitrienko N.M. (Ed.)* Tomsk: The City History in Illustrations, 1604–2004. Tomsk: TSU, 2004. 599 p. ISBN 5-7511-1782-4. (In Russian)
10. *Dmitrienko N.M. (Ed.)* Tomsk: The City History to the Present Day. Tomsk: TSU, 1999. 430 p. ISBN 5-7511-1020-X. (In Russian)
11. *Bogdanova O.V.* Architecture of Tomsk. Tomsk: Krasnoe znamya, 2005. 143 p. ISBN 5-9528-0032-7. (In Russian)
12. *Pallas P.S.* Travel to Different Provinces of Russia. Saint-Petersburg, 1786. 571 p. (In Russian)
13. *Alisov D.A.* Administrative Centers of Western Siberia: Urban Environment and Socio-Cultural Development (1870–1914). DSc Abstract. Omsk, 2007. 42 p. (In Russian)
14. *Gudkov A.A.* Regular Urban Planning in Siberia in the late 18th and early 19th Centuries. PhD Abstract. Moscow, 1989. 26 p. (In Russian)

15. *Alisov D.A.* Forstadts of Omsk (19th and early 20th centuries). *Izvestiya Omskogo gosudarstvennogo istoriko-kraevedcheskogo muzeya*. 1997; (5): 27–34. (In Russian)
16. *Pavlov G.A. (Ed.)* Encyclopedia of the Omsk-City, in 3 vol. Vol. 1. From the Past to the Present. Omsk, 2009. 249 p. ISBN 978-5-87821-152-9. (In Russian)
17. *Shilovsky M.V. (Ed.)* The History of Public Self-Government in Siberia in the 19th and Early 20th Centuries. Novosibirsk: Sova, 2006. 351 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Карелин Дмитрий Викторович, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, Ленинградская ул., 113, d.karelin@sibstrin.ru

Тырышкина Мария Сергеевна, магистрант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, Ленинградская ул., 113, ma.tyryshkina@yandex.ru

Authors Details

Dmitrii V. Karelin, PhD, A/Professor, Head of the Department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, d.karelin@sibstrin.ru

Mariya S. Tyryshkina, Undergraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, ma.tyryshkina@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 16.10.2024
Одобрена после рецензирования 06.12.2024
Принята к публикации 13.12.2024

Submitted for publication 16.10.2024
Approved after review 06.12.2024
Accepted for publication 13.12.2024

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 132–141.

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 (1): 132–141.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 693.22:624.04
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-132-141 EDN: OKCIRA

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПЛОЩАДКИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Иван Иванович Подшивалов, Сергей Васильевич Ющубе, Александр Александрович Тарасов
Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность* работы заключается в разработке методики оценки влияния нового технологического оборудования с динамическим воздействием от вибрационного грохота на напряженно-деформированное состояние металлического каркаса действующей производственной площадки цеха мокрого обогащения песка обогатительной фабрики.

Цель работы состоит в расчетном обосновании допустимости размещения нового технологического оборудования с обеспечением надежности металлических конструкций каркаса, который установлен в железобетонном приямке с монолитными стенами и фундаментной плитой на естественном основании.

Методы. Расчетное обоснование выполнено моделированием напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и грунтового основания производственной площадки в ПВК Ing+2021 MicroFe с разработкой расчетной конечно-элементной пространственной модели. При появлении новой динамической нагрузки от вибрационного грохота моделирование выполнено с учетом демпфирующих свойств материалов конструкций и грунта, а также динамических свойств грунта.

Результаты. После проведения раздельного статического расчета от стационарных нагрузок и динамического расчета от вибрационного воздействия грохота конструктивный расчет металлических элементов площадки на совместное действие статических и динамических нагрузок показал, что прочность/устойчивость и жесткость металлических конструкций каркаса при установке нового вибрационного грохота будут обеспечены.

© Подшивалов И.И., Ющубе С.В., Тарасов А.А., 2025

Ключевые слова: производственная площадка, конструкции, основание, технологическая нагрузка, моделирование, расчет, статика, динамика

Для цитирования: Подшивалов И.И., Ющубе С.В., Тарасов А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлического каркаса производственной площадки при динамическом воздействии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 132–141. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-132-141. EDN: OKCIRA

ORIGINAL ARTICLE

FINITE ELEMENT MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF MANUFACTURING SITE METAL STRUCTURE UNDER DYNAMIC LOAD

Ivan I. Podshivalov, Sergei V. Yushchube, Aleksandr A. Tarasov
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. *Purpose:* The aim of this work is to calculate the admissible allocation of new technological equipment with reliable metal frame in reinforced-concrete area with cast-in-situ walls and foundation slab on earth foundation.

Methodology/approach: The stress-strain state of structures and earth foundation of the manufacturing site is performed by the finite element method using the verified software package Ing+ 2021 MicroFe and proposed finite element model. Static analysis of loads, dynamic analysis of the vibratory screen, joint analysis of static and dynamic loads.

Research findings: It is found that under new dynamic load from the vibratory screen, FEM is performed with consideration of damping properties of the structural materials and soil as well as dynamic properties of the latter. It is shown that strength/stability and rigidity of metal structures is ensured for the frame at the installation of the vibratory screen.

Keywords: manufacturing site, structure, base, technological load, rigidity, finite element modeling, strength analysis, static load, dynamic load

For citation: Podshivalov I.I., Yushchube S.V., Tarasov A.A. Finite Element Modeling of Stress-Strain State of Manufacturing Site Metal Structure Under Dynamic Load. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 132–141. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-132-141. EDN: OKCIRA

В процессе эксплуатации промышленных зданий довольно часто возникает необходимость замены технологического оборудования, что вызывает потребность в анализе изменившегося напряженно-деформированного состояния каркаса здания с учетом его фактического технического состояния и в соответствии с современными нормативными документам [1, 2]. При этом следует исключить возможность отказа отдельных элементов или всего каркаса, который может быть вызван некорректной оценкой влияния нового технологического оборудования на напряженно-деформированное состояние существующего каркаса [3, 4].

Анализ надежности несущих металлических конструкций показывает, что минимизация ущерба возможна путем корректной оценки взаимодействия несущих элементов между собой [5]. Например, для стропильных ферм доста-

точно реализовать конструктивные мероприятия применительно к связевым элементам покрытий [6].

Как известно, расчет зданий следует выполнять совместно с основаниями. Выбор расчетной модели, которая может наиболее полно отразить конструктивную схему здания, является одним из важнейших факторов при определении напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, фундаментов и оснований [7].

Модель линейно деформированного основания, в которой грунтовая среда представляется упругим материалом, основана на двух допущениях: осадка точки поверхности основания прямо пропорциональна величине нагрузки; осадки распространяются за пределы площади нагружения [8, 9].

Известно, что динамические свойства грунтов зависят от характера динамического воздействия [10, 11]. Наиболее корректные данные можно получить путем проведения соответствующих изысканий. В работе [12] было выполнено сравнение экспериментально полученных первых трех форм собственных колебаний 9-этажного панельного здания на свайном фундаменте с соответствующими модальными значениями в разработанной конечно-элементной модели в ПК SCAD при различной жесткости грунтового основания. Авторы публикации подтверждают нормативное положение о том, что при динамических воздействиях следует учитывать динамические свойства грунтов, например, заданием модуля упругости грунта по зависимости $E_e = 8E_0$, где E_0 – модуль деформации нескального грунта.

Динамические испытания позволяют определить параметры собственных колебаний здания путем регистрации микросейсмических колебаний отдельных конструкций здания [13]. Результатом динамических исследований являлись собственные частоты, построенные схемы распределения амплитуд и карты фаз колебаний. Анализ полученных динамических параметров позволил сделать интегральную оценку технического состояния исследуемого здания.

В работе [14] получены экспериментальные значения ускорений и перемещений отдельных точек фундамента при циклическом динамическом воздействии от электроприводов. После обработки сигналов акселерометров получены спектры частот в диапазоне 0–250 Гц. Экспериментальные амплитуды колебаний тела фундамента сравнивались с предельно допустимыми амплитудами колебаний.

В натурных исследованиях [15] выполнено измерение параметров колебаний несущих конструкций каркаса производственного здания и работающих механизмов, получены акселерограммы ускорений во времени и диаграммы спектральной плотности ускорений колебаний несущих элементов каркаса и работающих механизмов. Установлены резонансные явления по спектру частот в работе шаровых мельниц оборудования.

Основной задачей исследований [16] являлось определение причин появления повышенных амплитуд колебаний колонн металлического каркаса и сравнение частот собственных колебаний металлических конструкций каркаса с частотой вынужденных колебаний технологического оборудования с помощью установки акселерометров на несущие элементы каркаса и на технологическое оборудование. В конструкциях каркаса экспериментально опреде-

лены частоты колебаний, получены графики перемещений во времени, амплитудный спектр колебаний в координатах «ускорение – частота». Для оценки собственных частот колебаний элементов металлического каркаса была разработана пространственная конечно-элементная модель в ПК SCAD, где задавались как статические, так и динамические воздействия.

В настоящей статье рассматривается производственная площадка цеха мокрого обогащения песка обогатительной фабрики. Опорная часть площадки расположена в заглубленном приямке на отм. –6.000 с монолитными железобетонными стенами и фундаментной плитой на естественном основании. Конструктивно площадка выполнена из металлического каркаса, состоящего из колонн (двутавр I20Ш1), главных и второстепенных балок (двутавры I45Б1, I35Б1, I25Б1). На площадке предполагается размещение нового технологического оборудования в виде вибрационного грохота Derrick весом 42,2 кН с характеристиками: число оборотов вращения вала n = 800 об/мин с частотой f = 84 рад/с (рис. 1).

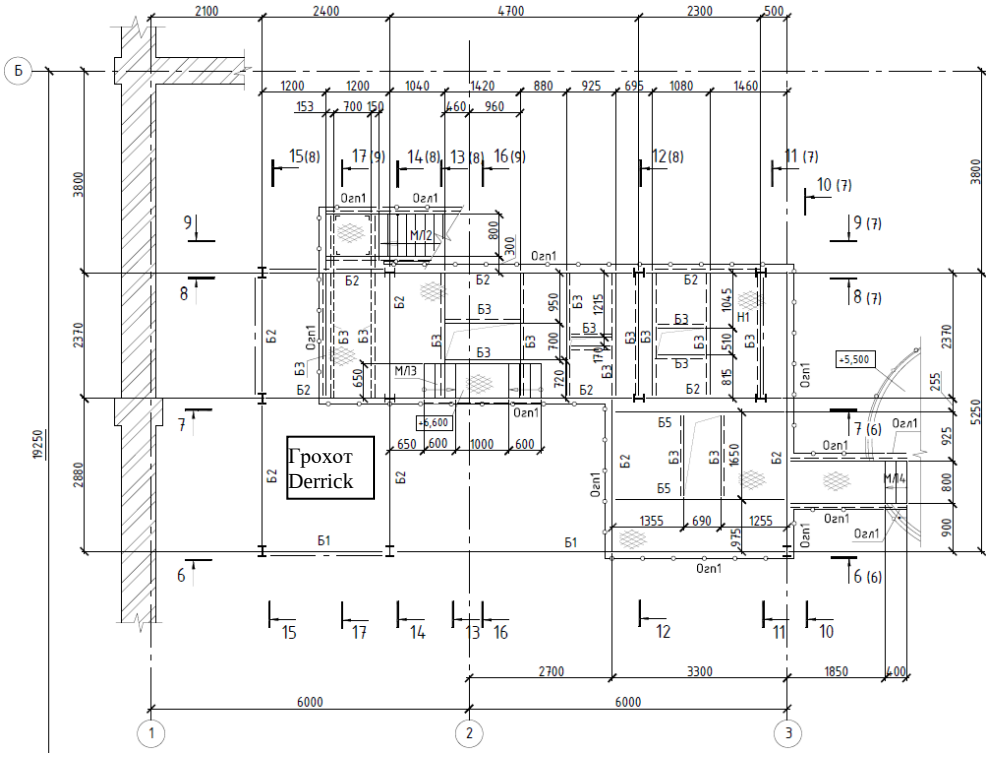
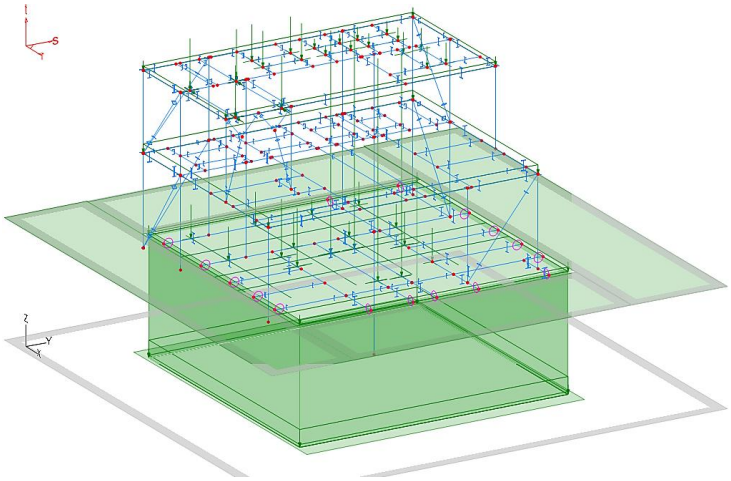


Рис. 1. Схема размещения вибрационного грохота Derrick на площадке отм. +6.000
Fig. 1. Schematic of Derrick vibratory screen at +6 000 level site

Моделирование взаимодействия надземных конструкций с грунтовым основанием в настоящее время является достаточно актуальным [17]. Верифицированный ПВК Ing+2021 MicroFe позволяет реализовать конечно-элементное моделирование в системе «основание – фундамент – здание», на основании

которой была разработана пространственная расчетная конечно-элементная модель производственной площадки (рис. 2). В расчетной модели железобетонные монолитные стены и фундаментная плита приямка моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», металлические колонны и балки моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунт снизу и сбоку приямка моделировался в виде слоистого основания из объемных конечных элементов.

а



б

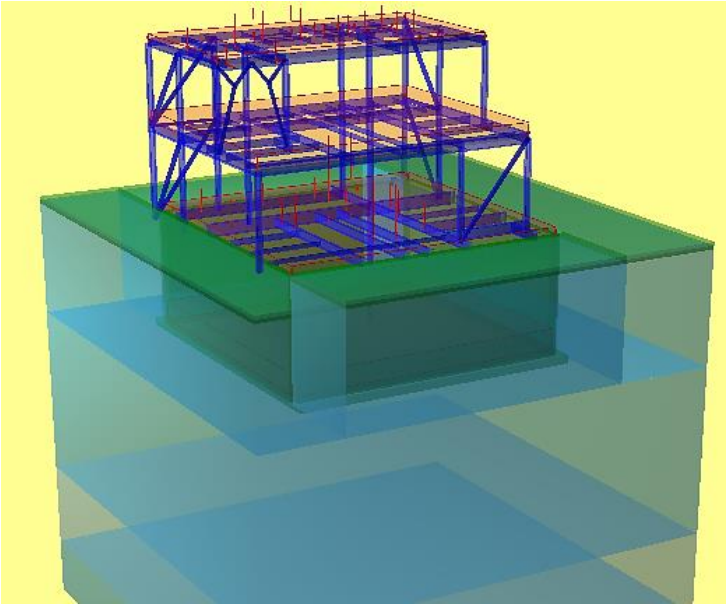


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель (*а*) и ее визуализация (*б*)
Fig. 2. FEM (*a*) and visualization (*b*)

В расчетной схеме конечно-элементной модели в условиях динамического воздействия приняты следующие нормативные положения:

– материалы конструкций и грунт основания – линейно изотропные;

– расчетные и нормативные статические нагрузки, только нормативные динамические нагрузки;

– демпфирующие свойства материалов металлического каркаса и железобетонного монолитного приямка задавались с помощью вычисленных (по собственным частотам колебаний) коэффициентов демпфирования для массы c_m и коэффициентов демпфирования для жесткости c_k;

– слоистое основание принято в виде упруговязкого линейно деформируемого основания[1], свойства которого определяются коэффициентами сжатия и сдвига, характеризующими демпфирование. Демпфирующие свойства грунта, при неучете его массы в линейном расчете, были смоделированы заданием коэффициента демпфирования для жесткости грунта c_k увеличением в десять раз. Динамические свойства грунта учитывались увеличением модуля деформации слоев грунта в восемь раз [12].

Раздельный статический и динамический расчеты выполнялись по комбинациям нагружений: 1-я комбинация – только статические нагрузки; 2-я комбинация – только динамическое воздействие от вибрационного грохота. В конструктивном расчете в расчетное сочетание усилий (РСУ) к статическим нагружениям было добавлено динамическое особое воздействие – динамические максимумы усилий из динамического расчета.

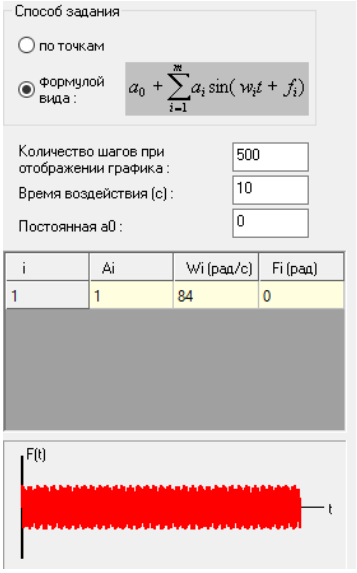


Рис. 3. Задание динамического воздействия от вибрационного грохота Derrick

Fig. 3. Dynamic load from Derrick vibratory screen

При выполнении динамической части расчета динамическое воздействие на металлический каркас площадки от работы вибрационного грохота задавалось в виде временной зависимости, приведенной на рис. 3.

Полученные из статического расчета от стационарных нагрузок, в том числе от собственного веса грохота, изополя продольных сил и вертикальных перемещений металлического каркаса приведены на рис. 4, 5, на которых показано, что наибольшая продольная сила возникла в центральной колонне приямка и составила $N_{\max\ кол}$ = –281,75 кН, а максимальные вертикальные перемещения характерны для пролетной части балок перекрытия приямка и равны 29,7 мм, прогибы составляют $f_{\max}$ = 20,3 мм, что меньше предельно допустимых значений $f_{u\ верт}$ = 29,0 мм.

Из конструктивного расчета элементов металлического каркаса по РСУ по заданной комбинации нагружений, в которой к статическому нагружению добавлены динамические максимумы усилий от работающего вибрационного грохота Derrick (параметры динамического воздействия приведены на рис. 3),

[1] СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками.

следует, что наибольший коэффициент использования сечения конструкций по условию устойчивости плоской формы изгиба $К_{ик}$ = 0,86 < 1 (рис. 6). Таким образом, прочность/устойчивость и жесткость элементов металлического каркаса обеспечены при статическом нагружении и динамическом воздействии от вибрационного грохота.

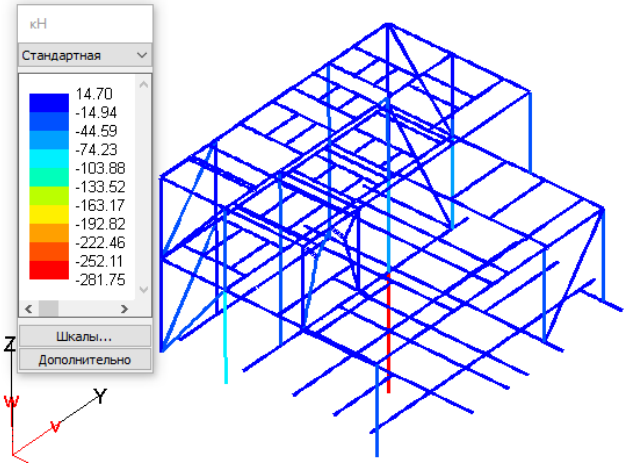


Рис. 4. Изополя статических продольных сил в элементах каркаса
Fig. 4. Isofields of static longitudinal forces in frame elements

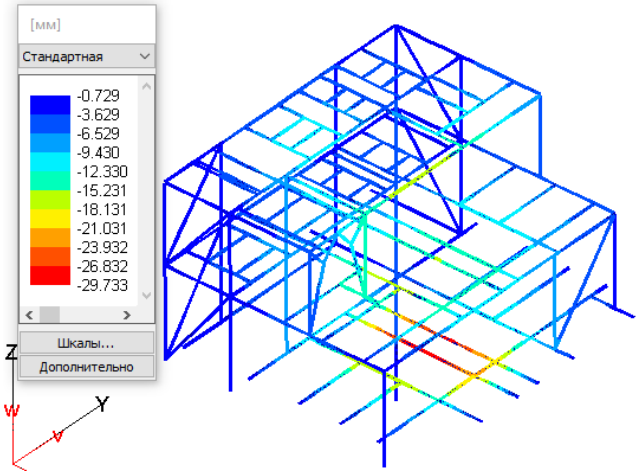


Рис. 5. Изополя статических вертикальных перемещений элементов каркаса
Fig. 5. Isofields of static vertical forces in frame elements

В заключение можно отметить следующие результаты: при установке нового технологического оборудования в виде вибрационного грохота Derrick на верхнем уровне перекрытия производственной площадки изменится напряженно-деформированное состояние конструкций металлического каркаса, монолитного железобетонного приямка и грунтового основания.

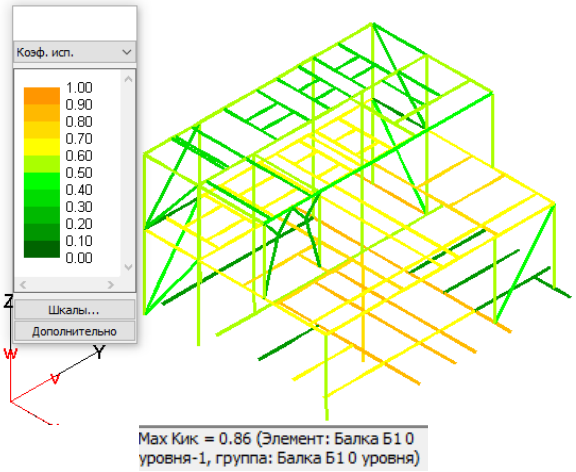


Рис. 6. Изополя коэффициентов использования сечения конструктивных элементов каркаса
Fig. 6. Isofields of use factors of cross-sections in frame elements

Для оценки сложившейся ситуации выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций площадки, приямка и основания при появлении новой динамической нагрузки с учетом демпфирующих свойств материалов конструкций и грунта, а также динамических свойств грунта.

После проведения раздельного статического расчета от стационарных нагрузок и динамического расчета от вибрационного воздействия грохота конструктивный расчет металлических элементов площадки на совместное действие статических и динамических нагрузок в РСУ показал, что прочность/устойчивость и жесткость элементов каркаса при установке нового вибрационного грохота будут обеспечены.

Список источников

1. *Золина Т.В., Туснин А.Р.* Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49.
2. *Золина Т.В.* Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108.
3. *Боровский Д.С.* Расчет на прочность усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 36–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-36-41
4. *Гукова М.И., Искендиров В.Г., Фарфель М.И.* Ошибки проектирования, изготовления и монтажа, приводящие к аварийному состоянию строительных конструкций производственных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительства. 2013. № 10. С. 25–28.
5. *Еремин К.И., Матвеюшкин С.А.* Анализ риска несущих конструкций покрытий стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительства. 2011. № 3. С. 16–18.
6. *Еремин К.И, Матвеюшкин С.А.* Анализ надежности несущих конструкций покрытия стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительства. 2010. № 10. С. 19–21.
7. *Шашкин К.Г.* Расчет напряженно-деформированного состояния основания фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство : интернет-журнал. 2001. № 4. С. 6.

8. *Алексеев С.И., Камаев В.С.* Учет жесткостных параметров зданий при расчетах оснований и фундаментов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 3. С. 165–172.
9. *Михайлов В.С., Теплых А.В.* Учет характерных особенностей различных моделей основания при расчете взаимного влияния зданий на больших фундаментных плитах с использованием расчетно-аналитической системы SCAD Office // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : VI Международный симпозиум. Владивосток, 2016. С. 133–134.
10. *Цытович Н.А.* Механика грунтов (краткий курс). Москва : Высшая школа, 1983. 288 с.
11. *Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях / пер. с англ. под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка. Санкт-Петербург : НПО «Георeконструкция – Фундамент – Проект», 2006. 384 с.
12. *Волгин Г.А., Рожков А.Ф., Инжутов И.С., Гончаров Ю.М.* Численно-экспериментальное исследование динамических параметров крупнопанельного здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3. С. 111–120.
13. *Хорошавин Е.А.* Динамические испытания административного здания «Красноярскгражданпроект» в г. Красноярске // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 128–143.
14. *Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Однокопылов Г.И., Пахмурин О.Р.* Особенности диагностики нагруженных фундаментов электроприводов газокомпрессорной станции без остановки технологических процессов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1. С. 114–121.
15. *Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Савченко В.И., Коштунков В.Г., Пляскин А.С.* Биение пространственного каркаса обогатительной фабрики под действием периодических нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 2. С. 139–143.
16. *Плевков В.С., Саркисов Д.Ю., Балдин С.В.* Анализ параметров колебательных процессов несущего каркаса производственного здания // Строительство и реконструкция. 2017. № 4 (72). С. 47–56.
17. *Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Ларионов А.С.* Оценка надежности сооружения, расположенного на склоне горы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 23 (1). С. 126–139. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-1-126-139

REFERENCES

1. *Zolina T.V., Tusnin A.R.* Extending of Operation Life of Industrial Building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. (In Russian)
2. *Zolina T.V.* Examination Procedure for Building Residual Operation Life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. (In Russian)
3. *Borovskiy D.S.* Strength Analysis of Rod Elements of Steel Structures under Multiparameter Loading. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 36–41. (In Russian)
4. *Gukova M.I., Iskendirov V.G., Farfel M.I.* Design, Manufacturing and Installation Errors Leading to Emergency Condition of Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; (10): 25–28. (In Russian)
5. *Eremin K.A., Matveyushkin S.A.* Risk analysis of Bearing Structures of Steel Frame Coverings of One-Storey Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; (3): 16–18. (In Russian)
6. *Eremin K.A., Matveyushkin S.A.* Strength Analysis of Bearing Structures of Steel Frame Coverings of One-Storey Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010; (10): 19–21. (In Russian)
7. *Shashkin K.G.* Stress-Strain State Analysis of Building Foundations with Regard to their Interaction. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2001; (4): 6. (In Russian)
8. *Alekseev S.I., Kamaev V.S.* Stiffness Parameters of Buildings in Strength Analysis of Foundations. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007; (3): 165–172. (In Russian)
9. *Mikhailov V.S., Teplykh A.V.* Allowing for Characteristics of Various Design Models in Calculating Mutual Influence of Buildings on pile-Raft Foundation in SCAD Software. In: *Proc. 6th*

Int. Sci. Symp. 'Relevant Computer Modeling Problems of Structures'. Vladivostok. 2016. Pp. 133–134. (In Russian)
10. *Tsytovich N.A.* Soil Mechanics. Moscow: Vysshaya shkola, 1983, 288 p. (In Russian)
11. *Ishihara K.* Soil Behavior in Earthquakes: Saint-Petersburg: NPO "Georeconstruction-Fundament-Project", 2006. 384 p. (Russian translation)
12. *Volgin G.A., Rozhkov A.F., Inzhutov I.S., Goncharov Yu.M.* Experimental and Numerical Analysis of Dynamic Parameters of Large-Panel Building. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; (3): 111–120. (In Russian)
13. *Khoroshavin E.A.* Dynamic Tests of Administrative Building "Krasnoyarskgrazhdanproekt" in Krasnoyarsk. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (2): 128–143. (In Russian)
14. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Odnokopylov G.I., Pakhmurin O.R.* Diagnostics of Loaded Foundations of Gas Compressor Station Without Process Shutdown. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; (1): 114–121. (In Russian)
15. *Kopanitsa D.G., Kaparulin S.L., Savchenko V.I., Koshtunkov V.G., Plyaskin A.S.* Beating of Spatial Framework of Concentrating Plant Under Periodic Loads. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007; (2): 139–143. (In Russian)
16. *Plevkov V.S., Sarkisov D.Yu., Baldin S.V.* Analysis of Vibrational Process Parameters of Load-Bearing Frame of Industrial Building. *Teoriya inzhenernykh sooruzhenii. Stroitel'nye konstruktsii*. 2017; 72 (4): 47–56. (In Russian)
17. *Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Larionov A.S.* Safety of Building Constructed on Hillside Slope. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (1): 126–139. (In Russian)

Сведения об авторах

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

Ющубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Тарасов Александр Александрович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

Authors Details

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

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; sv@tsuab.ru

Aleksandr A. Tarasov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tar.a.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 03.12.2024
Одобрена после рецензирования 20.12.2024
Принята к публикации 15.01.2025

Submitted for publication 03.12.2024
Approved after review 20.12.2024
Accepted for publication 15.01.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 142–156.

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 (1): 142–156.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 699.86
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-142-156 EDN: OQCXZQ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ С ЛЕГКИМИ ВЕНТИЛИРУЕМЫМИ ФАСАДАМИ И КРОВЛЯМИ

Александр Юрьевич Окунев, Евгений Владимирович Левин
Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Ограждающие конструкции зданий находятся в постоянно меняющихся внешних тепловых условиях, это приводит к изменениям внутреннего теплового микроклимата помещений, что необходимо учитывать при проектировании тепловой защиты зданий и инженерных систем отопления, вентиляции и кондиционирования. При этом оболочки зданий могут содержать вентилируемый фасад на относе и/или кровлю с вентилируемым зазором. В большинстве известных результатов исследований и методик расчета теплопереноса через такие конструкции, в силу сложности его механизма, недостаточно полно и точно учитывается нестационарность внешних тепловых воздействий. Причиной является невысокая эффективность и точность используемых методик расчета.

Цель выполненных исследований – создание эффективной физико-математической модели, позволяющей проводить расчеты нестационарного теплопереноса через стеновые ограждающие конструкции и покрытия, содержащие легкие фасады с вентилируемым зазором.

Методы. Для проведения расчетов разработана комбинированная аналитическая и численная модель теплопереноса через ограждающие конструкции и покрытия, содержащие вентилируемый зазор. Модель включает итерационный расчет нестационарного

© Окунев А.Ю., Левин Е.В., 2025

переноса тепла в вентилируемом зазоре с использованием уравнений «мгновенного» теплового баланса в вентилируемой прослойке с учетом конечно-разностного детального расчета нестационарного переноса теплоты в ограждающей конструкции.

Результаты. Результаты, получаемые с использованием разработанной модели, показывают хорошее совпадение с известными экспериментальными и расчетными данными. В частности, для апробации модели рассмотрен случай теплопоступлений в помещение через легкий вентилируемый фасад и при его отсутствии. Показано, что в летний период использование вентилируемого фасада, несмотря на незначительное изменение сопротивления теплопередаче, позволяет значительно сократить теплопоступления в помещение.

Ключевые слова: моделирование, теплоперенос, тепловая защита, теплопоступления, вентилируемая прослойка, фасад, кровля

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российской академии архитектуры и строительных наук.

Благодарность: авторы благодарят коллектив Научно-исследовательского института строительной физики за участие в постановке проблемы, на решение которой направлены проведенные исследования.

Для цитирования: Окунев А.Ю., Левин Е.В. Моделирование нестационарного теплообмена через ограждающие конструкции с легкими вентилируемыми фасадами и кровлями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 142–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-142-156. EDN: OQCXZQ

ORIGINAL ARTICLE

MODELING OF UNSTEADY HEAT TRANSFER THROUGH BUILDING ENVELOPES WITH LIGHT VENTILATED FACADES AND ROOFS

Alexander Yu. Okunev, Evgeny V. Levin
Research Institute of Structural Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Science, Moscow, Russia

Abstract. Enclosing structures of buildings constantly change external thermal conditions, which leads to changes in the internal thermal microclimate of premises, which must be taken into account when designing thermal protection of buildings and engineering systems for heating, ventilation and air conditioning. Building envelopes contain ventilated facades and/or roofs with a ventilated gap. In most known research results and calculation methods of the heat transfer through structures is not fully and accurately taken into account due to the complexity of its mechanism, non-stationary external thermal effects. The reason is the low efficiency and accuracy of calculation methods.

Purpose: The creation of the effective physical and mathematical model that allows calculating non-steady heat transfer through wall enclosures and coatings containing light facades with a ventilated gap.

Methodology: A combined analytical and numerical model is proposed for the heat transfer through wall enclosing structures and coatings containing a ventilated facade. The model includes an iterative calculation of non-stationary heat transfer in a ventilated gap using balance equations of non-stationary heat in a ventilated layer, taking into account the finite-difference detailed calculation of non-stationary heat transfer in the enclosing structure.

Research findings: Based on the proposed model, good agreement is shown for experimental data and theoretical calculations. For the model testing, the heat gain into the room through

a light ventilated facade and in its absence are considered. It is shown that in summer, the ventilated facade allows for a significant heat reduction in the room, despite an insignificant change in the heat transfer resistance.

Keywords: modeling, heat transfer, insulation, heat gain, ventilated gap, facade, roof

Funding: This work was financially support by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences.

***Acknowledgments*:** The authors like to express their gratitude towards the research team of Research Institute of Structural Physics RAACS for providing valuable comments and discussions.

For citation: Okunev A.Yu., Levin E.V. Modeling of Unsteady Heat Transfer through Building Envelopes with Light Ventilated Facades and Roofs. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 142–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-142-156. EDN: OQCXZQ

Введение

Многослойные ограждающие конструкции, в том числе с наружным слоем эффективного утепления, часто содержат вентилируемые прослойки между покрытием фасада и непосредственно оболочкой здания, ограждающей внутренние помещения от окружающей среды. Использование вентилируемых прослоек является одним из эффективных технических решений тепловой защиты зданий, обеспечивая необходимый тепловлажностный режим конструкций. Такие вентилируемые конструкции могут быть как стеновыми, так и кровельными. При этом важным является достаточно подробное изучение тепловых процессов, протекающих в подобных вентилируемых системах, и их влияние на текущее состояние теплового микроклимата в помещениях зданий.

В работе [1] представлен обзор исследований по ограждающим конструкциям зданий, содержащим внутренние воздушные слои в стенах, окнах, крышах. В данном обзоре имеется более 200 ссылок на результаты исследований различных систем с воздушными прослойками. За исключением натурных экспериментальных исследований, которые в основном носят частный характер и трудно поддаются обобщению, имеются также и более общие расчетно-теоретические результаты. Например, в работе [2] приводится схема расчета температуры воздуха, его скорости и термического сопротивления воздушной прослойки. В исследовании [3] описана методика расчета тепловой защиты замкнутых воздушных прослоек с учетом коэффициентов излучения отражающих поверхностей, установленных в прослойке. В работе [4] приведены результаты исследования теплопритоков внутрь зданий с использованием легких (неутепленных) кровель с воздушным вентилируемым зазором. В работе [5] рассматривались также и более сложные системы организации покрытия. Это покрытия, построенные по схеме: кровля – вентилируемая прослойка – утеплитель с зеркальной поверхностью. В таком покрытии лучистый теплообмен в прослойке снижается за счет отражения зеркальной поверхностью, что приводит к повышению теплозащитных свойств конструкции.

К настоящему времени большинство выполненных исследований ограничено рассмотрением стационарного теплопереноса в вентилируемых фасадах, в связи с чем ответ на вопрос, каким образом тепловые процессы в венти-

лируемых прослойках могут в реальных условиях внешних переменных во времени тепловых воздействий повлиять на текущий тепловой микроклимат в помещениях, в значительной степени отсутствует. Основная причина заключается в том, что для решения данной задачи в вентилируемом фасаде требуется одновременное рассмотрение сильно отличающихся физических процессов теплопереноса: нестационарный трансмиссионный перенос тепла в основной оболочке здания, который является сравнительно медленным по отношению к внешним тепловым воздействиям на фасад и протекает за счет механизма теплопроводности; конвективный и лучистый переносы теплоты внутри воздушной прослойки, величины которых быстро реагируют на внешние тепловые воздействия. Такая совместная задача относительно несложно формализуется, а ее решение может быть реализовано численно с использованием конечных разностей. При этом лимитирующая величина последовательных шагов по времени, на которых должно находиться решение, определяется быстропротекающими процессами в воздушной прослойке и на фасаде здания. Требуемые шаги по времени оказываются настолько малыми, что расчеты только одного варианта нестационарного теплообмена здания с внешней средой в течение периода времени, например, в одни сутки (характерный период времени внешних тепловых воздействий на здание) могут потребовать неоправданно больших ресурсов вычислительной техники. В таких условиях говорить о каких-либо масштабных расчетных исследованиях по оптимизации тепловой защиты зданий в реальных условиях не приходится.

Целью исследования является разработка эффективной физико-математической модели, позволяющей проводить расчеты нестационарного теплопереноса через стеновые ограждающие конструкции и покрытия, содержащие легкие фасады с вентилируемым зазором.

Представленная в настоящей статье модель разработана для широко распространенных в строительстве легких фасадных систем и кровель, которые отделены от несущей оболочки здания с высокой тепловой инерцией вентилируемой воздушной прослойкой. Легкая фасадная система или кровля выполнены на относе от оболочки здания, включают в себя покрытие с малой тепловой инерцией и практически не имеют значительной тепловой защиты (например, металл, тонкий пластик, тонкостенное дерево или камень и пр.).

Для проведения расчетов нестационарного теплообмена между помещениями здания и внешней средой предложена физико-математическая модель, основанная на комбинировании аналитических расчетов теплопереноса в вентилируемом фасаде и численных расчетов нестационарного конвективного теплопереноса в ограждающих конструкциях. Аналитические расчеты, в силу малой тепловой инерции вентилируемого фасада, основаны на итерационном решении уравнений «мгновенного» теплового баланса в воздушной прослойке. При этом в воздушной прослойке в качестве граничных тепловых условий на ограждающей конструкции используется точное численное решение для уравнений нестационарного теплообмена между вентилируемом фасадом и помещениями, протекающего в высоко инерционной ограждающей конструкции.

Используемая в модели принципиальная схема фасада с плоской вентилируемой прослойкой приведена на рисунке. Наружный и внутренний воздух

имеют переменную во времени температуру $T(t)_{\text{нар}}$ и $T(t)_{\text{вн}}$ соответственно (здесь и далее t – время, с). На наружную часть покрытия прослойки поступает переменный во времени, в зависимости от характера внешних тепловых воздействий на поверхность строительного объекта, тепловой поток с плотностью $J(t)_{\text{фас}}$. Способы определения этого потока в натурных условиях с учетом прямого и рассеянного солнечного излучения, лучистого теплообмена с окружающей средой и переменной температуры наружного воздуха приведены в работе [6].

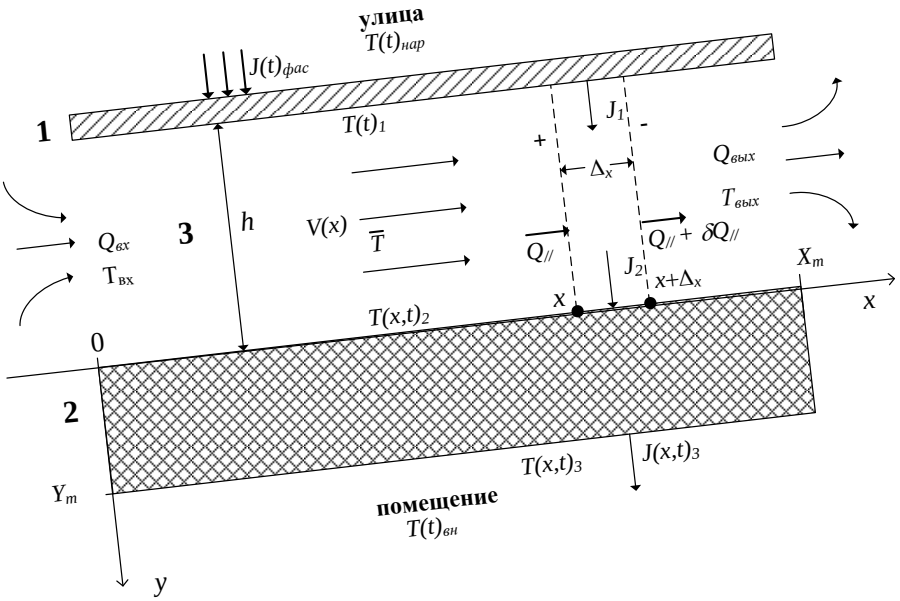


Схема фасада с плоской вентилируемой прослойкой:

1 – внешнее покрытие вентилируемой прослойки; *2* – основная часть оболочки здания (несущие конструкции, утепление, отделка и пр.); *3* – внутренняя воздушная часть вентилируемой прослойки

Scheme of a facade with a flat ventilated layer:

1 – external covering of the ventilated layer; *2* – main part of the building shell (load-bearing structures, insulation, finishing); *3* – internal air part of the ventilated layer

Вентилируемая прослойка может быть ориентирована под углом к горизонту, как это показано на рисунке (например, кровля здания), или может быть вертикально расположенной (стена здания). Воздушная прослойка имеет длину X_m и толщину *h*, а оболочка здания имеет толщину Y_m. С внутренней стороны внешнее покрытие *1* имеет температуру поверхности $T(t)_1$.

В рамках настоящего исследования принято, что плотность потока $J_{\text{фас}}$ и температура T_1 слабо зависят от координаты *x* по длине покрытия, что практически всегда выполняется для горизонтальных и наклонных покрытий. Для вертикальных покрытий такая зависимость может иметь место за счет расслоения температуры наружного воздуха по высоте.

От внутренней поверхности покрытия *1* в прослойку поступает поток теплоты с плотностью $J(t)_1$, который зависит от времени, и в общем случае за счет тепловой инерции его мгновенные значения могут отличаться от мгновенных значений плотности потока $J_{фас}$, поступающего на наружную поверхность покрытия.

Температура T_2 соответствует температуре наружной поверхности оболочки здания (внутренней поверхности вентилируемого зазора). Ее величина, как и величина температуры T_1, также будет зависеть от времени, но к этой зависимости добавляется еще и зависимость от координаты *x*, это связано с тем, что по мере движения воздуха в прослойке его температура меняется за счет теплообмена с внешним покрытием *1* и теплообмена с помещением здания через оболочку *2*, т. е. $T_2 = T(x,t)_2$. Из прослойки на наружную поверхность оболочки здания поступает поток тепла с плотностью J_2, который, как и температура T_2, зависит от времени и от продольной координаты x. В результате теплообмена между наружной поверхностью оболочки *2* и внутренним воздухом помещения на внутренней поверхности оболочки формируется нестационарное поле температуры $T(x,t)_3$ и плотности теплового потока $J(x,t)_3$. Мгновенная величина $J(x,t)_2$ не совпадает с $J(x,t)_3$, поскольку в оболочке *2* за счет нестационарности теплообмена постоянно протекают процессы накопления, отдачи и перераспределения в объеме тепловой энергии.

Прослойка является открытой с обеих сторон. На входе в нее поступает воздух с температурой $T_{вх}$ и поток тепла $Q_{вх}$, Вт, а температура выходящего воздуха равна $T_{вых}$ и поток тепла $Q_{вых}$.

Задачей расчетов является: определить температурное поле $T(x,t)_3$, пространственно-временное распределение плотности потока $J(x,t)_3$ и поток тепла $Q(t)_{вых}$, уносимый выходящим из прослойки воздухом в зависимости от существующих величин тепловых воздействий на фасад $J(t)_{фас}$ и $T(t)_{нар}$. Для этого используется физико-математическая модель, описывающая нестационарный перенос тепла в двух связанных между собой граничными условиями областях, входящих в данную систему. Первая из этих областей (назовем ее «*конвективная область*») включает в себя внешнее покрытие вентилируемой прослойки *1* и ее внутреннюю воздушную часть *3*. Вторая область («*трансмиссионная область*») включает оболочку здания *2* и внутренний объем в помещении, между которыми имеет место нестационарный теплообмен.

В предлагаемой физико-математической модели в «*конвективной области*» для исключения сложных газодинамических расчетов используются следующие допущения о характере протекающих процессов:

1. Поскольку фасадная система с воздушной прослойкой является «легкой», то температура наружной части покрытия *1* близка к температуре его внутренней части T_1 (здесь и далее см. рисунок).

2. Рассматриваются воздушные прослойки, в которых их длина X_m много больше толщины h. В этом случае сложными трехмерными газодинамическими течениями внутри прослойки в теплопереносе можно пренебречь и заменить их одномерным течением, в качестве характеристик которого используются средняя скорость воздуха по толщине прослойки $V(x)$ и его средняя температура $\bar{T}(x)$. При этом должно учитываться, что величина $\bar{T}$ отличается от величин T_1 и T_2 на границах прослойки.

Результаты

В рамках рассмотренных условий принято, что если в воздушной прослойке в направлении ее оси *x* в какой-то момент времени выделить слой воздуха малой длины Δ_x (см. рисунок), то тепловой баланс в объеме этого слоя можно записать в виде

$$\begin{cases} \delta Q_{//} = B\Delta_x\left(J_1 - J_2\right); \\ J_1 = L_1\left(T_1 - \bar{T}\right) + \sigma\varepsilon_{\text{прив}}\left(T_1^4 - T_2^4\right); \\ J_2 = L_2\left(\bar{T} - T_2\right) + \sigma\varepsilon_{\text{прив}}\left(T_1^4 - T_2^4\right). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь L_1 и L_2 – коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхностях внутри прослойки, Вт/(м^2·К); $\delta Q_{//}$ – изменение среднего по сечению продольного теплового потока, переносимого воздухом (далее конвективного теплового потока), Вт; *B* – ширина воздушной прослойки, м; $\varepsilon_{\text{прив}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$ – приведенный коэффициент излучения поверхностей на границах в прослойке; ε_1, ε_2 – коэффициенты излучения каждой поверхности воздушной прослойки с учетом их формы [7]; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) – постоянная Стефана – Больцмана.

В случае легкого фасада принимаем, что для каждого момента времени и для каждой точки координаты x в силу малой тепловой инерции величина J_1 равна плотности теплового потока $J_{\text{фас}}$, поглощаемого фасадом. При этом величина плотности теплового потока на наружной стороне зависит от наружных условий и температуры фасада T_1.

Плотность потока $J(x,t)_2$ определяет поступление тепла на оболочку *2* здания и его дальнейший трансмиссионный перенос через оболочку. Его величина соответствует нестационарному градиенту температуры в оболочке *2* вблизи ее поверхности ($y > 0$):

$$J_2 = -\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала оболочки здания, Вт/(м·К).

В уравнениях (1) принято, что средняя температура воздуха $\bar{T}$, его плотность ρ и средняя скорость V не меняются по толщине h и зависят только от координаты x и времени. Эта зависимость определяется изменениями во времени температуры T_1 и тем, что теплота, поступающая в воздух от наружного покрытия *1*, приводит к изменению средней температуры воздуха и, как следствие, к изменению его плотности и скорости за счет того, что массовый расход воздуха вдоль прослойки является постоянной величиной:

$$\rho V = \text{const}, \tag{3}$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3.

Изменение среднего по сечению конвективного теплового потока в (1) будет определяться как

$$\delta Q_{//} = Bh\rho V C_{\text{в}}\left(\bar{T}_{-} - \bar{T}_{+}\right), \tag{4}$$

где $C_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

При этом плотность воздуха можно выразить из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{PM}{R\bar{T}}, \tag{5}$$

где P – давление воздуха, Па; $M = 29$ г/моль – молярная масса воздуха; $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Разделив теперь воздушную прослойку на множество таких же параллельных воздушных слоев с толщиной Δ_x и для каждого из них используя уравнение теплового баланса (1), получаем систему разностных уравнений для расчета приращений продольного теплового потока в воздухе $\delta Q_{//}$ по длине прослойки в зависимости от изменяющейся во времени температуры $T_1(t)$ и температуры входящего в прослойку наружного воздуха $T_{\text{вх}}(t)$.

Для вынужденной конвекции за счет перепада давления воздуха между входом и выходом из прослойки необходимо учитывать потери давления в канале прослойки. В свою очередь, плотность воздуха и скорость его потока также должны зависеть от перепада давления и температуры. Для учета этих зависимостей необходимо знать потери давления, существующие за счет сил вязкого трения в канале. Такие зависимости представлены формулами, полученными с использованием серии вычислительных экспериментов по расчетам течения вязкого газа:

$$\begin{cases} \dfrac{dP}{dx} = KV^{1{,}78677}; \\ K = \dfrac{24{,}494}{h^{1{,}1757}}. \end{cases} \tag{6}$$

Здесь величины коэффициентов соответствуют скорости V в м/с и толщине прослойки h в мм. Температура воздуха в воздушной прослойке по мере движения воздуха меняется на единицы, в отдельных случаях – на десятки градусов. Соответственно, плотность воздуха меняется на единицы и доли единиц

процентов, формула (5). Этот факт позволяет упростить решение системы уравнений, задавая скорость воздуха в продольном направлении постоянной, соответствующей средней температуре воздуха между входом и выходом из канала:

$$\langle \bar{T} \rangle = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}. \qquad (7)$$

Здесь и далее оператор $\langle\ \rangle$ означает осреднение соответствующей величины по длине прослойки.

В этом случае $V(x,t) \approx \langle V \rangle$, и первое уравнение системы (6) переписывается в виде

$$P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} = X_m K \langle V \rangle^{1,78677}, \qquad (8)$$

а из уравнений (4) и (1) можно получить выражение для нахождения температуры на выходе из объема длиной Δ_x:

$$\bar{T}_- = \frac{\Delta_x (J_1 - J_2)}{h \langle \rho \rangle \langle V \rangle C_{\text{в}}} + \bar{T}_+. \qquad (9)$$

В системе (1) неопределенными являются коэффициенты теплоотдачи L, которые в общем случае зависят от скорости V, температуры $\bar{T}$ и, самое главное, от характера течения воздуха в прослойке.

Для нахождения коэффициентов теплоотдачи используем безразмерные критерии подобия, которые часто применяются при описании процессов в теплообменных газожидкостных системах [8].

Поток воздуха в вентилируемой прослойке может быть за счет вынужденной продольной конвекции, за счет свободной конвекции, а также за счет их сочетаний. Вынужденная конвекция протекает за счет перепада давления между входом и выходом прослойки. Свободная конвекция протекает под действием подъемных (гравитационных) сил в воздухе за счет изменения его плотности из-за разницы температуры по длине канала прослойки.

На теплоперенос внутри воздушной прослойки также оказывает влияние характер течения – ламинарный или турбулентный. При турбулентном течении теплообмен в равных условиях всегда гораздо выше. Критерием перехода от одного течения к другому является величина числа Рейнольдса, которое для плоской прослойки имеет вид

$$\text{Re} = \frac{\langle V \rangle d}{\nu}, \qquad (10)$$

где $d = 2h$ – эквивалентная толщина прослойки, м; $\nu \approx 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ м^2/с – кинематическая вязкость воздуха.

При этом:

– ламинарный режим течения характеризуется величиной числа Re до 2300;

– при значении числа Re от 2300 до 10 000 режим течения является переходным;

– турбулентный режим течения наблюдается при числах Re более 10 000.

Для ламинарного течения воздуха тип конвекции в каналах определяется числом Грасгофа

$$\mathrm{Gr} = \frac{g\beta d^3}{\nu^2}\Delta T \qquad (11)$$

и числом Прандтля

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}, \qquad (12)$$

где g = 9,81 м/с^2 – ускорение силы тяжести; β = 0,00367 К$^{-10}$ – температурный коэффициент объемного расширения воздуха; ΔT – разность средней температуры воздуха в прослойке $\bar{T}$ и температуры стенок прослойки T_1 и T_2; $a = \rho\lambda_в / C_р$ – коэффициент температуропроводности воздуха, м^2/с; $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Если величина $\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr} > 8\cdot10^5$, то свободная конвекция должна учитываться при решении задачи, если $\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr} < 8\cdot10^5$ – влияние свободной конвекции пренебрежимо мало. Используя параметры воздуха, критерий оценки влияния свободной конвекции можно свести к простой оценке по величине параметра

$$\xi = d^3 / \Delta T. \qquad (13)$$

Если ξ > 5·10^{-3}, то свободная конвекция должна учитываться, а если ξ < 5·10^{-3}, то свободной конвекцией можно пренебречь.

Будем считать, что течение воздуха в канале является симметричным относительно его средней плоскости. В этом случае коэффициенты теплоотдачи в (1) L_1 и L_2 на поверхностях канала будут одинаковыми, и их средняя величина может быть вычислена как

$$\bar{L} = \frac{\mathrm{Nu}\cdot\lambda}{d}. \qquad (14)$$

Здесь Nu – безразмерный критерий подобия Нуссельта, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности.

Для нахождения величины числа Нуссельта для плоского канала и, соответственно, коэффициента теплоотдачи используются критериальные уравнения (см., например, [9]), которые соответствуют различным типам конвекции (вынужденная или вынужденная с учетом свободной) и двум типам течения воздуха – ламинарное и турбулентное:

– для ламинарного течения без учета свободной конвекции

$$\mathrm{Nu} = 1{,}4\left(\mathrm{Re}\frac{d}{X}\right)^{0,4}\mathrm{Pr}^{0,33}; \qquad (15)$$

– для ламинарного течения с учетом свободной конвекции

$$\mathrm{Nu} = 0{,}15\,\mathrm{Re}^{0,33}\,\mathrm{Pr}^{0,43}\,\mathrm{Gr}^{0,1}\varepsilon_L; \qquad (16)$$

– для ламинарного течения с учетом естественной конвекции

$$\mathrm{Nu} = 0{,}021\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}^{0,43}\,\varepsilon_L; \qquad (17)$$

– для турбулентного течения

$$\mathrm{Nu} = 0{,}021\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}^{0,43}\,\psi. \qquad (18)$$

Чисто свободная конвекция не рассматривается, поскольку она характерна больше для замкнутых воздушных прослоек.

При расчетах коэффициента теплоотдачи значения критериев Re и Pr берутся при средней температуре воздуха в объеме всей прослойки. Коэффициент ε_L учитывает изменение коэффициента теплоотдачи по длине прослойки. Для ламинарного течения он зависит от отношения $\gamma = \frac{X_m}{d}$, а для турбулентного также и от величины числа Re. Для сравнительно длинных прослоек ($\gamma \geq 50$) величины коэффициентов ψ и ε_L практически равны единице.

Сформулированная выше модель теплопереноса в вентилируемой прослойке позволяет с использованием итерационных методов провести расчет динамики теплопоступлений J_2 из воздушной прослойки на внешнюю поверхность оболочки здания *2*. Для этого на последовательных шагах по времени используется следующая процедура расчетов.

Положим, что для какого-либо шага по времени все параметры в воздушной прослойке являются уже известными.

При переходе к следующему шагу по времени известными являются величины, связанные с текущими значениями внешних тепловых воздействий на воздушную прослойку: $Q_{\text{вх}}$, $T_{\text{вх}}$, $J_{\text{фас}}$. В результате для проведения прямого расчета на новом шаге по времени не хватает значений T_1 и $T_{\text{вых}}$. В первом приближении эти параметры можно взять равными их значениям в предыдущий расчетный момент времени. Задав таким образом эти параметры, величины J_1, $\langle \bar{T} \rangle$, $\langle V \rangle$ в первом приближении на новом шаге по времени также становятся определенными.

Далее расчет производится последовательными итерациями параметров по длине канала. Рассчитав по (9) температуру на выходе, получаем новое значение $T_{\text{вых}}$. Итерации прекращают, когда отклонение значения $T_{\text{вых}}$ от значения на предыдущей итерации достаточно мало.

Полученное итоговое значение $T_{\text{вых}}$ соответствует заданному первому приближению T_1, которое также требует уточнения. Для этого в процессе расчетов по (9) одновременно также интегрируют тепловой поток на внутренней поверхности покрытия воздушной прослойки $Q_1 = B\sum J_1(x)\Delta$ и находят среднее значение его плотности:

$$\langle J_1 \rangle = \frac{Q_1}{X_m B}. \qquad (19)$$

Нахождение значения T_1 сводится к выбору такого значения, при котором его величина J_1, рассчитанная по (19), соответствовала значению, полученному по (1). Этого достигают проведением итераций по температуре T_1, например, методом двоичного деления.

Использование описанного подхода позволяет получить зависимость $J_2(x)$ в расчетный момент времени. Эта зависимость используется далее для

расчета нестационарного теплопереноса через оболочку здания *2* (расчеты в «*трансмиссионной области*») на том же шаге по времени. Дополнительными параметрами, представляющими интерес при расчетах в «*конвективной области*», являются полученная температура фасада T_1, скорость $\langle V \rangle$ и температура воздуха на выходе из воздушной прослойки $T_{\text{вых}}$, а также поток тепла $Q_{\text{вых}}$, уносимый воздухом из прослойки.

В используемой физико-математической модели в «*трансмиссионной области*» проводится расчет теплообмена между поверхностью [0–X_m; 0] и помещением через поверхность [0–X_m; Y_m] (см. рисунок) с использованием конечно-разностного численного решения уравнения переноса тепла, записанного для температуры:

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]. \qquad (20)$$

Здесь C_p – удельная теплоемкость материала оболочки *2*, Дж/(м^3·К); λ – его теплопроводность, Вт/(м·К). В качестве граничных условий используются следующие:

$$-\lambda \partial T(x,0,t)/\partial y = J(x,t)_2; \qquad (21)$$

$$-\lambda \partial T(x,Y_m,t)/\partial y = L_3\left(T(t)_{\text{вн}} - T(x,Y_m,t)_3\right) = J(x,Y_m,t)_3; \qquad (22)$$

$$-\lambda \partial T(0,y,t)/\partial x = 0; \qquad (23)$$

$$-\lambda \partial T(X_m,y,t)/\partial x = 0. \qquad (24)$$

В граничном условии для внутренней поверхности оболочки: L_3 – коэффициент теплоотдачи воздуху помещения, Вт/(м^2·К). Условия (23) и (24) соответствуют отсутствию теплообмена на границах в продольном направлении, что корректно, если вентилируемая прослойка имеет достаточно большую длину X_m.

В граничном условии (21) используется величина плотности теплового потока $J(x,t)_2$, которая для того же момента времени и для той же пространственной точки на оболочке здания предварительно находится при описанном ранее решении задачи в «*конвективной области*».

В граничном условии (22) использована зависимость температуры внутреннего воздуха только от времени, что может соответствовать модели идеального смешения и пренебрежению расслоением температуры по высоте помещения. При использовании внутреннего отопления или кондиционирования температура $T_{\text{вн}}$ также может быть задана постоянной величиной.

Для решения краевой задачи (20) – (24) в качестве начального условия для температуры внутри оболочки *2* может быть задано ее постоянное значение во всем объеме, например, температура внутреннего воздуха

$$T(x,y,0) = T_{\text{вн}}. \qquad (25)$$

В этом случае, проводя расчет в течение, например, 3–5 и более суточных циклов, задаваемых периодически повторяющимися внешними тепловыми воз-

действиями, можно получить достаточно точное детализированное во времени численное решение по теплопоступлениям в помещение через вентилируемый фасад в течение рассматриваемых суток.

Для численного решения краевой задачи (20) – (25) применен явный конечно-разностный двухшаговый (трехслойный) по времени сеточный метод, обладающий высокой устойчивостью. Решение ищется в узлах двухмерной пространственной сетки с шагами Δ_x и Δ_y, м, и с шагом по времени δt, с. При этом пространственный шаг Δ_x и шаг δt должны соответствовать шагам, используемым при нахождении решения в «*конвективной области*» (более корректно говорить о том, что расчеты в «*конвективной области*» должны быть синхронизированы с расчетами в «*трансмиссионной области*»). Высокая устойчивость метода и, как следствие, возможность использования сравнительно больших шагов по времени, требуемых при проведении значительных объемов исследований, достигается за счет построения расчетной конечно-разностной схемы на основе метода Дюфорта – Франкеля [10]. В этой схеме в конечно-разностных аппроксимациях вторых пространственных производных на втором слое по времени проводится осреднение центрального члена по двум соседним слоям (см., например, [11]). На практике используемая схема расчета по объему вычислений, при заданной выбором величин шагов по времени и пространству точности, оказывается в четыре раза более эффективной по сравнению с традиционной одношаговой двухслойной по времени явной схемой. Второй порядок точности при использовании данной расчетной схемы достигается при задании шага по времени δt, исходя из соотношения

$$\delta t \le \frac{C_p}{\lambda}\left(\Delta_y\right)^2. \qquad (26)$$

При этом одновременно должно учитываться условие, что шаг δt одновременно не должен превышать характерной величины времени возможных изменений внешних тепловых воздействий на оболочку здания, которое в обычных условиях может составлять 20–30 мин.

В качестве примера применения представленной выше модели проведен расчет нестационарного теплопереноса через ограждающую конструкцию, состоящую из эффективного утеплителя ($\lambda = 0{,}05$ Вт/(м·К)) толщиной 15 см и отделочного слоя изнутри ($\lambda = 0{,}15$) толщиной 1,2 см. Ограждающая конструкция ориентирована на юг, в помещении поддерживается постоянная температура 22 °С. Наружные климатические условия соответствуют архивным метеорологическим данным г. Москвы за 2011 г. Расчет проведен для всего летнего периода для двух вариантов ограждения здания: с вентилируемым фасадом с воздушной прослойкой 2,5 см и без него.

В результате расчетов получено, что за весь летний период максимальные мгновенные теплопоступления на внутренней поверхности оболочки здания составили: J_2 = 21,6 Вт/м^2 – для варианта без вентилируемого фасада и J_2 = = 10,2 Вт/м^2 – в случае наличия вентилируемой прослойки. Максимальные за весь период значения среднесуточных теплопоступлений составили 6,0 и 4,1 Вт/м^2 для вариантов без вентилируемой прослойки и с прослойкой. Таким

образом, наблюдается снижение теплопоступлений в 1,5–2 раза, притом что сопротивление теплопередаче конструкции, определенное в стационарных условиях, увеличилось лишь на 1,6 %.

Заключение

Разработана модель нестационарного теплопереноса через ограждающие конструкции, содержащие легкие вентилируемые фасады и кровли. Данная модель максимально полно учитывает теплообмен здания с окружающей средой.

Полученная модель позволяет достаточно точно и эффективно производить расчеты теплопоступлений и теплопотерь через ограждающие конструкции.

Применение модели на примере малоинерционной стены с заполнением эффективным утеплителем (минеральная вата, пенополистирол и т. д.) показало, что, несмотря на незначительное увеличение сопротивления теплопередаче, вентилируемая прослойка позволяет снизить пиковые теплопоступления в помещение в летний период в 1,5–2 раза, что приводит к соответственным снижениям потребности в кондиционировании.

Список источников

1. *Tiantian Zhang, Yufei Tan, Hongxing Yang, Xuedan Zhang*. The application of air layers in building envelopes: A review // Applied Energy. 2016. № 165. P. 707–743.
2. *Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю.* Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 1 // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2004. № 2. С. 20–26. EDN: SMDKZB
3. *Умнякова Н.П.* Теплозащита замкнутых воздушных прослоек с отражательной теплоизоляцией // Жилищное строительство. 2014. № 1–2. С. 16–20. EDN: ZSNOJX
4. *Banionis K., Stankevičius V., Monstvilas E.* Heat exchange in the surface of lightweight steel roof coatings // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. V. 17. № 1. P. 88–97.
5. *Shikha Ebrahim, Adel Alshayji*. Redusing Solar Heat Gain From Included Buildings' Roof by Using Radiant Barrier System. URL: https://www.academia.edu/65921943/Reducing_Solar_Heat_Gain_From_Inclined_Buildings_Roof_By_Using_Radiant_Barrier_System?email_work_card=abstract-read-more (accessed 2013).
6. *Окунев А.Ю., Левин Е.В.* Лучистый теплообмен ограждающих конструкций зданий с окружающей средой // Жилищное строительство. 2023. № 6. С. 43–51. DOI: 10.31659/044-4472-2024-7-43-51
7. *Левин Е.В., Окунев А.Ю., Умнякова Н.П., Шубин И.Л.* Основы современной строительной термографии. Москва : НИИСФ РААСН, 2012. 170 с.
8. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. 9-е изд., перераб. Москва : Наука, 1981. 448 с.
9. *Пищулин В.П.* Расчет кожухотрубчатого теплообменника. Северск : СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. 37 с.
10. *Du Fort E.C., Frankel S.P.* Stability Conditions in the Numerical Treatment of Parabolic Differential Equations // Math. Tables Other Aids Comput. 1953. V. 7. № 43. P. 135–152.
11. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика / пер. с англ. В.А. Гущина, В.Я. Митницкого ; под ред. П.И. Чушкина. Москва : Мир, 1980. 616 с.

References

1. *Tiantian Zhang, Yufei Tan, Hongxing Yang, Xuedan Zhang.* The Application of Air Layers in Building Envelopes: A Review. *Applied Energy*. 2016; (165): 707–743.
2. *Gagarin V.G., Kozlov V.V., Cykanovskij E.Yu.* Calculation of Facade Thermal Protection with Ventilated Air Gap. Part 1. *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika*. 2004; (2): 20–26 (In Russian)

3. *Uminakova N.P.* Thermal Protection of Closed Air Layers with Reflective Thermal Insulation. *Energoeffektivnoe stroitel'stvo*. 2014; (1–2): 16–20. (In Russian)
4. *Banionis K., Stankevičius V., Monstvilas E.* Heat Exchange in Lightweight Steel Roof Coatings. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2011; 17 (1): 88–97.
5. *Shikha Ebrahim, Adel Alshayji*. Redusing solar heat gain from included buildings' roof by using radiant barrier system. Available: www.academia.edu/65921943/Reducing_Solar_Heat_Gain_From_Inclined_Buildings_Roof_By_Using_Radiant_Barrier_System?email_work_card=abstract-read-more (accessed 2013).
6. *Okunev A.Yu., Levin E.V.* Radiant Heat Exchange of Building Envelopes with the Environment. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2023; (6): 43–51, DOI: 10.31659/0044-4472-2023-6-43-51 (In Russian)
7. *Levin E.V., Okunev A.Yu., Umnyakova N.P., Shubin I.L.* Modern Building Thermography Basics. Moscow, 2012. 170 p. (In Russian)
8. *Sedov L.I.* Similarity and Dimensionality Methods in Mechanics. 7th ed. Moscow: Nauka, 1981. 448 p. (In Russian)
9. *Pishchulin V.P.* Calculation of Shell-and-Tube Heat Exchanger. Seversk, 2010. 37 p. (In Russian)
10. *Du Fort E.C., Frankel S.P.* Stability Conditions in the Numerical Treatment of Parabolic Differential Equations. *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*. 1953; 7 (43): 135–152.
11. *Roach P.* Computational Fluid Dynamics. Moscow: Mir, 1980, 616 p. (Russian translation)

Сведения об авторах

Окунев Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, okunevay@gmail.com

Левин Евгений Владимирович, канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, evlev@list.ru

Authors Details

Alexander Yu. Okunev, PhD, Senior Researcher, Research Institute of Structural Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Proezd, 127238, Moscow, Russia okunevay@gmail.com

Evgeny V. Levin, PhD, Senior Researcher, Research Institute of Structural Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Proezd, 127238, Moscow, Russia, evlev@list.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 03.09.2024
Одобрена после рецензирования 19.09.2024
Принята к публикации 29.01.2025

Submitted for publication 03.09.2024
Approved after review 19.09.2024
Accepted for publication 29.01.2025

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 157–171.

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 (1): 157–171.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 628.316
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-157-171 EDN: OWMDZZ

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ОТ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Александра Александровна Князева, Олеся Олеговна Смолина
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Проблема* исследования. Увеличение загрязнения поверхностного стока техногенными примесями, повышение их концентрации в сточных водах и аккумулирование в открытых водных источниках.

Актуальность. Очистка дождевых, талых вод биоинженерными сооружениями на территории со сложным рельефом.

Цель исследования. Систематизация и обобщение способов очистки сточных вод с урбанизированных территорий, оценка их эффективности.

Новизна. Структуризация данных по очистке сточных вод. Авторская сравнительная оценка качества очистки поверхностных стоков различными способами: фильтрующие патроны, локальные очистные сооружения, биологическая очистка (биоинженерные сооружения). Оценка применения биоинженерных сооружений на локальных и линейных объектах на основании изученных примеров в России и мире. Разработка авторского экологического паспорта древесно-кустарниковой растительности для очистки дождевых, талых вод.

© Князева А.А., Смолина О.О., 2025

Задачи:

1) оценка качества очистки поверхностных стоков разными санитарно-техническими сооружениями с анализом периодичности эксплуатационных работ;

2) анализ отечественного и международного опыта применения биоинженерных сооружений с учетом температурных показателей и грунтов;

3) подбор древесно-кустарниковой растительности с высокой степенью очистки поверхностных стоков и широким ареалом произрастания на территории РФ;

4) апробация применения биоинженерных сооружений на территории со сложным рельефом: г. Новосибирск, ул. Гусинобродское шоссе и ул. Лазурная.

Методы исследования: теоретически-сравнительный анализ, систематизация, структуризация, моделирование.

Ключевые слова: поверхностный сток, биоинженерные сооружения, очистка, экологический паспорт, отечественный и международный опыт

Для цитирования: Князева А.А., Смолина О.О. Инженерно-экологические аспекты использования растений для очистки поверхностного стока от загрязняющих веществ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 157–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-157-171. EDN: OWMDZZ

ORIGINAL ARTICLE

ENGINEERING AND ECOLOGICAL ASPECTS OF PLANTING FOR CONTAMINATED SURFACE FLOW TREATMENT

Aleksandra A. Knyazeva, Olesya O. Smolina
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia

Abstract. *Problem statement:* Surface flow contamination with man-made impurities and increase in their concentration in wastewater and accumulation in open water sources.

Purpose: Systematization and generalization of surface flow treatment methods in urbanized areas, their effectiveness evaluation.

Methodology: The comparative analysis of the quality of surface flow treatment in various ways: filtering, local treatment plants, biological treatment (bioengineering facilities).

Research findings: Assessment of the quality of surface flow treatment using sanitary facilities and analysis of operational frequency; Russian and international experience in using bioengineering structures, taking into account temperature parameters and soil; selection of woody and shrubby vegetation with a high degree of surface flow treatment and a wide vegetation area in the Russian Federation; bioengineering structures used on difficult terrain of Novosibirsk, Gusinobrodsky highway and Lazurnaya Street.

Value: Data structuring of surface flow treatment. Application of bioengineering facilities based on the Russia and world experience. Development of the ecological passport of woody and shrubby vegetation for rain and meltwater treatment

Keywords: surface flow, bioengineering facilities, purification, environmental passport, Russian and foreign experience

For citation: Knyazeva A.A., Smolina O.O. Engineering and Ecological Aspects of Planting for Contaminated Surface Flow Treatment. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 157–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-157-171. EDN: OWMDZZ

В России существует множество территорий со сложным рельефом, что создает значительные трудности для градостроительства и обустройства инженерной инфраструктуры. В основном данные территории никак не благоустроены. В таких условиях строительство и эффективная работа ливневой канализации приобретают огромное значение. Несмотря на многочисленные исследования ученых (И.С. Щукин, А.Г. Мелехин [1], Е.Ю. Зайкова, С.С. Феофанова [2] и др.), на современном этапе развития инженерной инфраструктуры требуется актуализация знаний по очистке ливневых стоков разными методами и оборудованием для эффективной оптимизации распределения трудовой, экономической нагрузки.

Атмосферные сточные воды образуются в процессе выпадения осадков как в жилых районах, так и в местах расположения промышленных предприятий, такие воды называют дождевыми или талыми.

Основным источником загрязнения водного объекта являются сточные воды, образующиеся в городских районах. Проблема особенно актуальна для урбанизированных территорий, где масштабы загрязнения превосходят естественные показатели. Высокая степень водонепроницаемых покрытий приводит к тому, что объем ливневых стоков в городах значительно превышает объем стока в природных условиях, где почва и растительность выполняют функцию естественной фильтрации. Неблагоприятным фактором загрязнения окружающей среды являются поверхностные стоки с автомобильных дорог и городских улиц. В жилых районах в процессе образования атмосферных сточных вод накапливаются различные тяжелые металлы (свинец, цинк, медь, кадмий, хром, железо, алюминий, никель), нефтепродукты, пыль, органические вещества и другие загрязняющие примеси.

По мнению В.С. Дикаревского, Э.Ф. Емлина, содержание этих веществ достигает критических значений, требующих обязательной очистки перед сбросом в водоемы [3].

Влияние рельефа (крутизна склонов, наличие оврагов, низменных участков и водоемов) необходимо учитывать при проектировании ливневой канализации, что требует индивидуального подхода. На крутых склонах следует применять специальные лотки, а также устанавливать дополнительные удерживающие элементы, предотвращающие сползание грунта. В условиях резких перепадов высот требуется террасирование для водоотведения или использование специальных водосбросов. Овраги и другие естественные водотоки требуют укрепления и регулирования стока. Низменные участки являются зонами, которые могут быть подвержены затоплению.

Для решения проблемы загрязнения ливневых стоков в условиях сложного рельефа необходим комплексный подход: применение инновационных очистных сооружений, развитие систем «зеленой инфраструктуры», строительство локальных очистных сооружений, разработка и внедрение систем мониторинга качества ливневых стоков, нормативной базы и повышение экологической ответственности.

Для ливневых стоков используют различные методы очистки сточных вод, в том числе локальные очистные сооружения, биоинженерные сооружения, фильтрующие патроны в зависимости от вида присутствующих в воде загрязнений [4].

В связи с этим была проведена сравнительная оценка качества очистки поверхностных стоков от загрязнений разных санитарно-технических сооружений, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка качества очистки поверхностных стоков

Table 1

Comparison of the quality of surface flow treatment

Загрязнитель	Локальные очистные сооружения	Биоинженерные сооружения	Фильтрующие патроны
Крупные взвешенные вещества			
Мелкие взвешенные вещества			
Эмульгированные нефтепродукты			
Растворенные нефтепродукты			
Тяжелые металлы			

Примечание.

– высокая (70–100 %); – средняя (40–70 %); – низкая (10–40 %)

В табл. 2 показана периодичность эксплуатационных работ санитарно-технических сооружений.

Таблица 2

Периодичность эксплуатационных работ

Table 2

Frequency of maintenance works

Санитарно-технические сооружения	Перечень работ	Ориентировочная периодичность
Фильтрующий патрон	Проверка засоренности верхней решетки мусором	1 раз в месяц
	Проверка наличия/отсутствия слоя воды над фильтром	1 раз в месяц
	Проверка качества очистки (анализ стоков)	1 раз в 3 месяца
	Очистка верхней решетки фильтра	1 раз в месяц
	Выгрузка мусора из фильтра	1 раз в месяц
	Удаление жидких и твердых загрязнителей из фильтра	1 раз в месяц
	Замена отработанного фильтра	1 раз в год
Локальные очистные сооружения	Диагностика всех узлов и комплектующих	1 раз в год
	Профилактический ремонт	1 раз в год
	Очистка засоренности решетки дробилки	1 раз в месяц
	Очистка нефтеуловителей	2 раза в год
	Очистка резервуаров	1 раз в год
	Очистка фильтров от загрязнений	1 раз в месяц

Окончание табл. 2
End of table 2

Санитарно-технические сооружения	Перечень работ	Ориентировочная периодичность
Биологическая очистка (биоинженерные сооружения)	Высадка растений	1 раз с мая по октябрь
	Прополка	2 раза с мая по октябрь
	Контроль пропускной способности	2 раза с мая по октябрь
	Визуальный осмотр	1 раз с мая по октябрь
	Скашивание фитомассы. Рыхление/замена верхнего фильтрующего слоя	1 раз с мая по октябрь

Одним из практичных методов для очистки поверхностного стока с урбанизированных территорий в мировой практике признаны и находят все большее применение биотехнологии. С ростом урбанизации и увеличением площади застроенных территорий проблема загрязнения поверхностного стока становится все более актуальной. За рубежом биоинженерные сооружения относятся к доступным технологиям очистки поверхностного стока, которые сочетают в себе экономичность, эффективность и экологичность. Биотехнологии – это специальные конструкции, использующие природные процессы для очистки сточных вод. К ним относятся такие решения, как биофильтрационные траншеи, дождевые сады, биофильтрационные склоны. Эти сооружения активно используют древесно-кустарниковую растительность, которая помогает очищать загрязненные территории, поглощая различные вещества. Данный подход способствует восстановлению местной экосистемы.

Биофильтрационная (биодренажная) траншея – это искусственная конструкция, представляющая собой углубление в земле, заполненное фильтрующим материалом и засаженное влаголюбивыми растениями. Траншеи имеют трапециевидную форму и глубину до 1 м. Они предназначены для аккумулирования и фильтрации поверхностных стоков, что позволяет использовать их вдоль дорог, парков, парковок [1].

Максимальный продольный уклон фильтрационных траншей не должен превышать 4:1 или 3:1, чтобы предотвратить эрозию почвы. В сложных условиях местности рекомендуется применять террасы со ступенчатым уклоном, что дополнительно защищает почву от смыва. Использование влаголюбивых растений и биофильтрационных траншей способно эффективно очищать сточные воды, обеспечивая значительное снижение уровня загрязняющих веществ [2].

Дождевой сад представляет собой специально спроектированный участок глубиной от 0,5 до 1,0 м, заполненный слоями фильтрующего материала. Данное решение обеспечивает эффективную очистку воды. Наиболее распространенное сочетание – слой щебня крупной фракции внизу (для дренажа), затем слой более мелкого щебня, гравия или песка (для фильтрации), дальше идет слой плодородной почвы, где и высаживаются растения. Эти сооружения могут

абсорбировать на 30–40 % больше воды, чем обычный газон, благодаря своей способности задерживать и фильтровать ливневые стоки, что значительно снижает нагрузку на городскую ливневую канализацию. Сбор сточных вод в дождевом саду осуществляется одновременно с их фильтрацией, что позволяет улучшить качество воды, попадающей в грунтовые воды. Дождевые сады не только способствуют очистке воды, но и создают дополнительные зеленые пространства в городах, улучшая микроклимат.

Биофильтрационный склон – это наклонный участок земли, на котором высаживаются различные виды растительности для управления и очистки ливневых стоков. Основная задача такого склона – обеспечить естественную фильтрацию воды, проходящей через него, и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Оптимальный уклон около 1 % позволяет контролировать скорость движения потока, что важно для предотвращения эрозии почвы. Склоны могут быть засажены дикорастущей растительностью или подобранными растениями с учетом способности очистки сточных вод и микроклимата. Рекомендуемая высота травы – 50–150 мм. Биофильтрационные склоны представляют собой эффективный и экологически чистый способ управления ливневыми стоками, который не только решает проблемы загрязнения воды, но и способствует сохранению природного ландшафта. В условиях растущей урбанизации и изменения климата внедрение таких решений становится необходимым шагом на пути к устойчивому развитию и охране окружающей среды.

Результаты исследования, основанного на анализе опыта использования биоинженерных сооружений в России и за рубежом с учетом температурных показателей, характеристик грунтов и областей применения, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Примеры биоинженерных сооружений

Table 3

Bioengineering facilities

Объект	Местоположение, температурный режим	Грунты	Эффект очистки
Биофильтрационная (биодренажная) канава Область применения: улица, парк, парковка			по металлам (медь, цинк, свинец) – от 50 до 90 % по общему фосфору – 9 % по нитратам – 38 %
Зарубежный опыт			
	США, штат Техас, г. Даллас T_{max} = +33,0 °C T_{min} = +10,6 °C	Глинистые	
	США, штат Орегон T_{max} = +26,0 °C T_{min} = –1,8 °C	Глинистые	

Окончание табл. 3
End of table 3

Объект	Местоположение, температурный режим	Грунты	Эффект очистки
Отечественный опыт			
	РФ, г. Екатеринбург T_{max} = +18,1 °C T_{min} = –14,7 °C	Дерново-подзолистые	
Дождевой сад Область применения: улица, парк, парковка			по металлам (медь, цинк, свинец) – от 93 до 98 % по НП – свыше 75 % по общему фосфору – 70–83 % по нитратам – 68–80 % по БПК – 90; по патогенным бактериям – 90 %
Зарубежный опыт			
	США, штат Айова T_{max} = +23,0 °C T_{min} = –5,3 °C	Глинистые	
	Дания, г. Копенгаген T_{max} = +21,2 °C T_{min} = –1,7 °C	Дерново-подзолистые	
Отечественный опыт			
	РФ, Новое Девяткино (пригород Санкт-Петербурга) T_{max} = +19,5 °C T_{min} = –10,4 °C	Суглинки	
	РФ, г. Пермь T_{max} = +18,5 °C T_{min} = –12,5 °C	Дерново-подзолистые	
Биофильтрационный склон Область применения: парк, коллектор			по металлам (кадмий, медь, цинк, свинец) – от 50 до 90 % по общему фосфору – 9 % по нитратам – 38 % по биологическому потреблению кислорода (БПК) – 67 %
Зарубежный опыт			
	Япония, г. Токио T_{max} = +28,0 °C T_{min} = +7,0 °C	Глинистые	
Отечественный опыт			
	РФ, г. Москва. р. Ищенка T_{max} = +32,0 °C T_{min} = –8,0 °C	Суглинки	

Исследования биоинженерных сооружений поспособствовали изучению параметров растений для высокой степени очистки поверхностных стоков с учетом широкого ареала произрастания на территории РФ, результатом стал разработанный авторский экологический паспорт, представленный в табл. 4, универсальный вид которого был заимствован из исследования [5].

Таблица 4

Авторский экологический паспорт растений, способных очищать поверхностный сток

Table 4

Ecological passport of plants capable of cleaning surface flow

Способность к очистке загрязнения почвы и стоков		1	1	1	1	1	1	2	2	1
Химические элементы: Cu, Al, Pb, Fe, Zn, Mn		2	2	2	1	1	1	1	3	2
Тип насаждения		1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	2	2	1, 2, 3	2	2	2
Фактор времени и антропогенных нагрузок	Жизненный цикл (лет)	30	50	30	15	1–5	50	2	50	2
	Расстояние от тепло-трассы (м)	3–4	2	5–6	5–6	5–6	5–6	5–6	5–6	5–6
	Газоустойчивость	3	1	3	1	1	1	1	2	1
	Засухоустойчивость	–	–	–	+	+	+	+	+	+
	Зимостойкость	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Дополнительные функциональные возможности	Солнцезащита	+	+	+	–	–	–	–	–	–
	Ветрозащита	+	+	+	–	–	–	–	+	–
	Шумозащита	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Пылезащита	+	+	+	–	–	–	–	+	–
Аллелопатия	Данные растения хорошо взаимодействуют друг с другом									
Требования к	плодородию почвы	◭	▲	◭	△	△	△	△	◭	△
	влажности почвы	◥	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
	составу почвы	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
	освещению	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Темпы роста	max высота (м)	6	5	5	2	2	1	3,5	2	6
	Корневая система	3	3	3	1	1	1	1	1	1
	Форма кроны	7	4	7	–	–	–	–	–	–
	d кроны max (м)	6	2,5	15	–	–	–	–	–	–
	max *d* ствола (см)	75	200	100	–	–	–	–	–	–
	d ствола в 10 лет (см)	25	30	20	–	–	–	–	–	–
	Высота растения в 10 лет (м)	3	1	3	2	2	0,6	3,5	2	6
	Скорость роста после 10 лет	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Скорость роста до 10 лет	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Окончание табл. 4
End of table 4

Происхождение	М	М	М	М	М	М	М	И	М
Жизненная форма	К	К	К	ТР	ТР	ТР	ТР	ТР	ТР
Наименование вида	Ива козья	Ива пепельно-серая	Ива прутовидная	Ирис болотный	Камыш	Осока	Рогоз	Таволга вязолистная	Тростник

Условные обозначения:
Жизненная форма: К – кустарник, ТР – травянистое растение.
Происхождение: М – местное, И – интродуцент.
Скорость роста: ↑ – быстрая.
Форма кроны: 1 – колонновидная, 2 – коническая, 3 – пирамидальная, 4 – овальная/округлая, 5 – плакучая, 6 – стелющаяся, 7 – шаровидная, 8 – подушковидная, 9 – вьющаяся лиана.
Корневая система: 1 – мочковатая, 2 – стержневая, 3 – поверхностная.
Требования к освещению: ○ – гелиофиты, ◑ – сциофиты, гелиофобы, ● – сциогелиофиты.
Требования к составу почвы: ▨ – суглинок, ▩ – супесь, ■ – известняк.
Требования к влажности почвы: ▼ – гигрофит, ◥ – мезофит, ▽ – ксерофит.
Требования к плодородию почвы: ▲ – эвтотроф, ◭ – мезотроф, △ – олиготроф.
Зимостойкость: 1 – не промерзает, 2 – подмерзают однолетние побеги.
Засухоустойчивость: «+» да, «–» нет.
Газоустойчивость: 1 – очень устойчивые, 2 – устойчивые, 3 – относительно устойчивые/неустойчивые.
Солнцезащита: «+» да, «–» нет.
Ветрозащита: «+» да, «–» нет.
Пылезащита: «+» да, «–» нет.
Шумозащита: «+» да, «–» нет.
Тип насаждения: 1 – солитер, 2 – группа, 3 – рядовая посадка.
Очистка от загрязнений: 1 – высокая (70–100 %), 2 – средняя (40–70 %), 3 – низкая (10–40 %).
Очищение от химических элементов: 1 – высокая (70–100 %), 2 – средняя (40–70 %), 3 – низкая (10–40 %).

Выявлено, что ряд следующих растений: камыш, осока, рогоз, тростник, разновидности ив, ирис болотный, таволга вязолистная – обладают высокой степенью очистки поверхностных стоков.

Камыш выступает в роли «биофильтра». Его уникальная способность заключается в абсорбции различных органических соединений, включая фенолы, анилины и нефтепродукты. Результаты исследования [6] показали, что 300 г фитомассы камыша способны очистить 5 л воды от фенола за разный период времени в зависимости от начальной концентрации: 10 мг/л – за 4 дня, 40 мг/л – за 12 дней, 100 мг/л – за 29 дней. Помимо фенола камыш эффективно удаляет ксилолы и пирокатехины. Важно отметить, что эффективность очистки зависит от многих факторов, включая плотность посадки, состав почвы и окружающую среду.

Осока применяется для удаления тяжелых металлов и нефтепродуктов из окружающей среды. Способность осоки накапливать в своих тканях эти веще-

ства делает ее перспективной для использования в системах фиторемедиации загрязненных почв и вод. Например, осока демонстрирует значительную способность к накоплению меди (Cu – 0,055 мг/кг) [7]. Однако необходимо учитывать особенности накопления, избыточное количество тяжелых металлов может негативно повлиять на само растение.

Исследования показали, что корневая структура рогоза обладает способностью накапливать химические элементы. Результаты анализа корневой системы рогоза, произраставшего вблизи теплоэлектростанций, показали, что содержание металлов в корнях составило: железа – 199,1 мг/кг, марганца – 159,5 мг/кг, меди – 3,4 мг/кг, цинка – 16,6 мг/кг [8]. Эти данные свидетельствуют о высокой эффективности рогоза в качестве биосорбента, способного извлекать тяжелые металлы из почвы.

Разновидности ивы используют для очистки от загрязнения антропогенными примесями, также наблюдалась аккумуляция тяжелых металлов в первичной коре и ксилеме стебля.

Ирис болотный и тростник проявляют высокую эффективность в очистке воды от органических и неорганических частиц. Средние значения концентрации металлов, накопленных ирисом болотным за месяц, составили: медь – 8,33 мг/кг, алюминий – 4,39 мг/кг, свинец – 2,83 мг/кг, железо – 7,77 мг/кг, цинк – 10,93 мг/кг [9]. Для тростника эти показатели несколько ниже: медь – 2,00 мг/кг, алюминий – 2,85 мг/кг, свинец – 0,58 мг/кг, железо – 7,67 мг/кг, цинк – 2,97 мг/кг [9]. Разница в накоплении металлов может быть обусловлена различными физиологическими особенностями этих растений, а также условиями произрастания.

Таволга вязолистная помогает задерживать сточные воды за счет развитой корневой системы, снижает скорость поверхностного стока и предотвращает заиливание. Высокая активность к накоплению микроэлементов (Cu, Zn, Ba). Запас минеральных веществ – 3 ц/га при фитомассе до 50 ц/га [10].

Исследования подтверждают значительный потенциал фиторемедиации в очистке загрязненных территорий. Дальнейшие работы в этой области необходимы для оптимизации фиторемедиации и расширения списка эффективных растений, что позволит создать экологически чистые и эффективные технологии очистки окружающей среды. Важно также учитывать видовое разнообразие, условия произрастания и специфические характеристики накопления металлов у каждого растения для достижения результатов.

Результаты

В качестве апробации полученных результатов исследования рассмотрим территорию со сложным рельефом в г. Новосибирске: ул. Гусинобродское шоссе и ул. Лазурная. На основании топографической съемки местности в программном комплексе Civil 3D была создана цифровая авторская модель рельефа (рис. 1) для наглядной демонстрации поверхности участка.

Проектирование ландшафта на сложных рельефах требует комплексного подхода, учитывающего не только эстетическую составляющую, но и экологическую безопасность. Неправильные решения могут стать источником эрозии почвы и загрязнения водоемов. Использование растений позволяет решить эти проблемы эффективно и презентабельно.

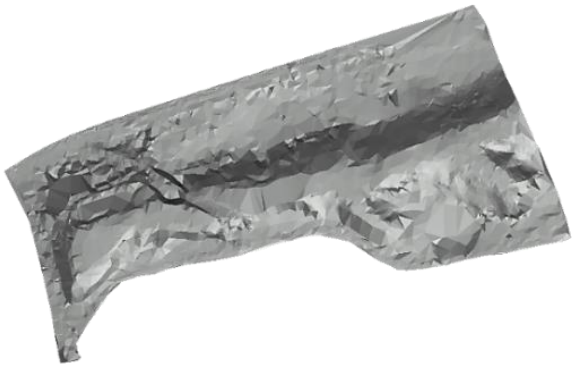


Рис. 1. Авторская модель рельефа, выполненная в Civil 3D
Fig. 1. Civil 3D-based model of surface geometry

После изучения выбранной территории были разработаны две схемы посадки древесно-кустарниковой растительности с учетом естественного рельефа, которые можно использовать для данного участка.

В схеме на рис. 2 предлагается создание комбинированной системы, состоящей из фильтрационного склона и дождевого сада. Основная идея – использовать древесно-кустарниковую растительность для естественной очистки сточных вод от загрязнений. Поверхностные воды, стекая по склону, проходят через специально подобранные растения, которые поглощают загрязняющие вещества. Дождевой сад, расположенный в нижней части склона, дополнительно аккумулирует и фильтрует воду.

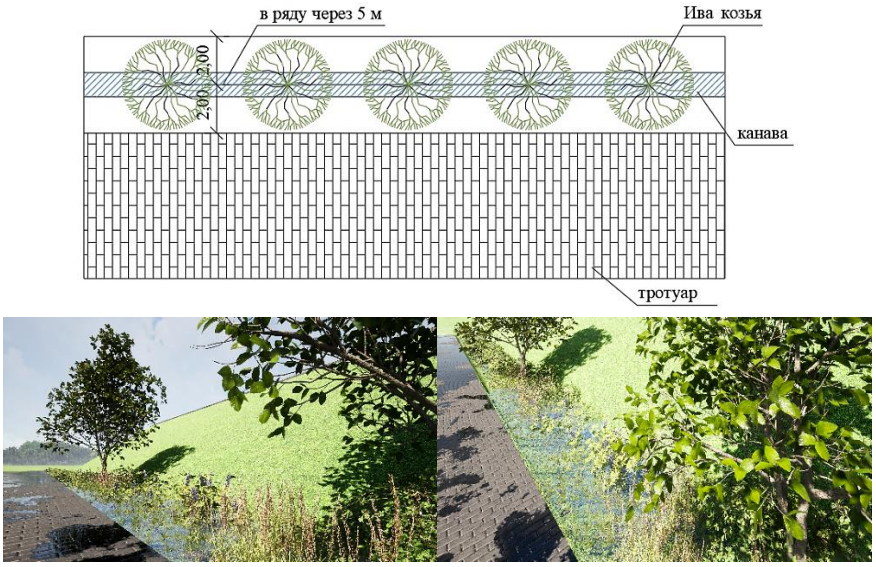


Рис. 2. Схема и визуализация размещения деревьев при устройстве дождевого сада на сложном рельефе
Fig. 2. Schematic and visualization of planting for rain gardening on difficult terrain

В данной схеме предлагается посадка ив в ряду через 5 м. Ивы обладают мощной корневой системой, которая укрепляет почву. Между ними размещаются влаголюбивые растения, выполняющие функцию очистки: камыш, тростник, ирис. Важно отметить, что эффективная работа фильтрационного склона зависит от правильного выбора грунта. Необходимо использовать почву с хорошей водопроницаемостью и дренажом, чтобы предотвратить застой воды. Следует также предусмотреть систему дренажных канав для отвода избытка воды.

На рис. 3 представлена схема, которая направлена на укрепление склона и предотвращение эрозии почвы. Основным элементом данной схемы является сосна, корневая система которой прочно связывает почву, препятствуя ее смыву. А ива предназначена для очистки сточных вод.

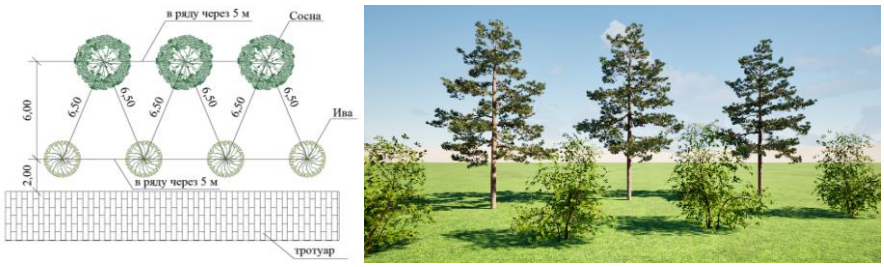


Рис. 3. Схема и визуализация размещения деревьев на выбранном участке
Fig. 3. Schematic and visualization of planting on selected terrain

Обе представленные схемы являются эффективными решениями для укрепления склонов и очистки поверхностных стоков. Выбор оптимальной схемы зависит от конкретных условий участка и поставленных задач.

Выводы

Биоинженерные сооружения предлагают инновационное и экологически чистое решение. Сравнительный анализ различных санитарно-технических сооружений показал, что биоинженерные системы превосходят стандартные методы по некоторым параметрам. Они не только эффективно снижают экологический риск, но и соответствуют современным требованиям к качеству очистки дождевых и талых вод. Преимуществом биоинженерных сооружений является их способность обеспечить комплексную защиту территории от избытка вод. Они выполняют не только функцию очистки, но и регулируют водный баланс, предотвращая эрозию почвы. Это особенно важно для участков со сложными градостроительными условиями. В таких местах стандартные системы очистки являются нецелесообразными.

Исследование выявило ряд растений, обладающих высокой степенью очистки сточных вод. Выбор конкретных видов растений зависит от климатических условий, типа почвы и степени загрязнения стоков. Разработанный экологический паспорт древесно-кустарниковой растительности является важным инструментом для оценки потенциала различных видов и выбора оптимальных вариантов для конкретных условий. Он позволяет оптимизировать выбор растений для достижения максимальной эффективности очистки в разных условиях.

Важно отметить, что эффективность очистки непосредственно связана с правильно подобранной растительностью. В исследовании были рассмотрены типовые способы посадки древесно-кустарниковой растительности с учетом сложного рельефа. Исследования должны быть направлены на изучение взаимодействия растений с различными загрязнителями.

Однако эффективность биоинженерных сооружений зависит не только от выбора растений и способа посадки, но и от правильного проектирования всей территории. Необходимо учитывать такие факторы, как объем, скорость стока, состав загрязнений, гидрологические условия и т. д. Это позволит оптимизировать конструкции биоинженерных сооружений и разработку рекомендаций по их применению в различных местностях.

Дальнейшие исследования в этой области, включая работу над магистерской диссертацией, направлены на усовершенствование существующих технологий и разработку новых, более эффективных методов очистки, что позволит обеспечить экологическую безопасность и сохранение природных ресурсов. Помимо этого, будут проведены исследования по экономической эффективности биоинженерных систем очистки сточных вод по сравнению с традиционными методами.

Список источников

1. *Мелехин А.Г., Щукин И.С.* Анализ существующих биоинженерных сооружений очистки поверхностного стока и возможности их применения в условиях Западного Урала // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2. С. 40–51. EDN: RBQSGB
2. *Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С.* Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1429–1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452
3. *Дикаревский В.С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И.* Отведение и очистка поверхностных сточных вод. Ленинград : Стройиздат. Ленингр. отделение, 1990. 224 с.
4. *Мадыхов Р.М., Хафизов Э.Р.* Применение фильтрующих патронов для очистки поверхностных стоков с городских улиц // Техника и технология транспорта. 2020. № 2. С. 19. EDN: XAKJDZ
5. *Савчук Д.Ю., Смолина О.О.* Особенности разработки и аспекты применения экологического паспорта природопользования на основе разновидностей древесно-кустарниковых пород для озеленения города Новосибирска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 1. С. 83–95. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-83-95
6. *Диренко А.А., Коцарь Е.М.* Использование высших водных растений в практике очистки сточных вод и поверхностного стока // ГК «ПРОФ-ВОДООЧИСТКА. URL: https://prof-vodochistka.ru/info/ispolzovanie-vysshikh-vodnykh-rastenij-v-praktike-ochistki-stochnykh-vod-i-poverkhnostnogo-stoka?ysclid=m2od4bceap115488001 (дата обращения: 25.10.2024).
7. *Глекнер А.А.* Очистка почв от меди при помощи осоки большехвостой // Молодежь и наука : сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края. Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2014. URL: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html
8. *Лапин А.А., Потапов В.В., Калайда М.Л., Мурадов С.В., Зеленков В.Н.* Очистка воды от загрязнений водными растениями // Бутлеровские сообщения. 2012. Т. 31. № 7. С. 85–92.
9. *Щукин И.С.* Очистка поверхностных сточных вод с применением фитофильтров : специальность 05.23.04 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пермь, 2019. 23 с.

10. *Авессаломова И.А.* Латеральные биогеохимические барьеры в агроландшафтах (на примере среднетаежной подзоны Восточно-Европейской равнины) // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии : материалы V Международной научной конференции. Минск, 2014. С. 176–178.

References

1. *Melekhin A.G., Shchukin I.S.* Analysis of Existing Bioengineering Structures for Surface Flow Treatment and Their Application in the Western Urals. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013; (2): 3. EDN: RBQSGB (In Russian)
2. *Zaykova E.Yu., Feofanova S.S.* Green Infrastructure as a Tool for Stormwater Management. *Vestnik MGSU*. 2022; 17 (11): 1439. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452 (In Russian)
3. *Dikarevsky V.S., Kurganov A.M., Nechaev A.P., Alekseev M.I.* Surface Wastewater Disposal and Treatment. Leningrad: Stroyizdat, 1990. 224 p. (In Russian)
4. *Madykhov R.M., Hafizov E.R.* Filter Cartridges for Cleaning Surface Flows in City Streets. *Tekhnika i tekhnologiya transporta*. 2020; (2): 19. EDN: XAKJDZ (In Russian)
5. *Savchuk D.Yu., Smolina O.O.* Vestnik Environmental Passport of Hardy-Shrub Species for Novosibirsk Landscaping: Development and Application. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (1): 83–95. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-83-95 (In Russian)
6. *Direnko A.A., Kotsar E.M.* Higher aquatic plants in wastewater and surface flow treatment. Available: https://prof-vodochistka.ru/info/ispolzovanie-vysshikh-vodnykh-rastenij-v-praktike-ochistki-stochnykh-vod-i-poverkhnostnogo-stoka?ysclid=m2od4bceap115488001 (accessed October 25, 2024). (In Russian)
7. *Gloeckner A.A.* Soil Purification from Copper using Carex Major-Tailed. In: *Proc. 10th All-Russ. Sci. Conf. 'The Youth and Science'*. Krasnoyarsk, 2014. Available: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html (accessed October 25, 2024). (In Russian)
8. *Lapin A.A., Potapov V.V., Kalayda M.L., Muradov S.V., Zelenkov V.N.* Water Purification of from Aquatic Plant Contamination. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2012; 31 (7): 85–92. (In Russian)
9. *Shchukin I.S.* Surface Flow Treatment with phytofilters. PhD Abstract. Perm, 2019. 23 p. (In Russian)
10. *Avessalomova I.A.* Lateral Biogeochemical Barriers in Agrolandscapes in the East European Plain. In: *Proc. 5th Int. Conf. 'Modern Problems of Landscaping and Geoecology'*. Minsk, 2014. Pp. 176–178. (In Russian)

Сведения об авторах

Князева Александра Александровна, магистрант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, aleksandra_knyazeva@mail.ru

Смолина Олеся Олеговна, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, zelenoest-vo@mail.ru

Authors Details

Aleksandra A. Knyazeva, Undergraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, aleksandra_knyazeva@mail.ru

Olesya O. Smolina, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, zelenoest-vo@mail.ru

Вклад авторов

Князева А.А. – концепция исследования, сбор и обработка материала, написание статьи.
Смолина О.О. − научное руководство и редактирование текста.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Knyazeva A.A.: conceptualization, data curation, collection and processing, writing − original draft preparation.
Smolina O.O.: supervision and editing the manuscript.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024
Одобрена после рецензирования 24.12.2024
Принята к публикации 13.01.2025

Submitted for publication 12.12.2024
Approved after review 24.12.2024
Accepted for publication 13.01.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 172–179.

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 (1): 172–179.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 674.02:533.924
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179 EDN: RTQDOW

ПОВЫШЕНИЕ БИОСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ ПОТОКОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Геннадий Георгиевич Волокитин[1], Владимир Алексеевич Черемных[1], Александр Мартынович Адам[2], Юрий Сергеевич Саркисов[1]
[1]*Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия*
[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Одним из основных факторов, определяющих использование древесины в строительстве, считается её устойчивость к биологическим воздействиям – биостойкость. Наиболее распространенным способом защиты древесины от негативных воздействий являются специальные пропитки или покрытия, которые имеют определенные ограничения по сроку службы и условиям использования обработанной древесины. В качестве альтернативы этим методам рассматривается обработка древесины с помощью потока низкотемпературной плазмы.

Цель настоящей работы – определение влияния обработки поверхности изделий из древесины сосны потоком низкотемпературной плазмы на биостойкость обработанных изделий по интенсивности развития грибов на поверхности изделий.

Результаты. Исследования показали, что обработка поверхности изделий из сосны низкотемпературной плазмой способствует увеличению их биостойкости. На образцах, подвергнутых плазменной обработке, интенсивность роста грибов оказалась ниже по сравнению с необработанной древесиной и древесиной, обработанной специализированным защитно-декоративным покрытием.

© Волокитин Г.Г., Черемных В.А., Адам А.М., Саркисов Ю.С., 2025

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, древесина, биостойкость, плазменная обработка, защитно-декоративное покрытие

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

Для цитирования: Волокитин Г.Г., Черемных В.А., Адам А.М., Саркисов Ю.С. Повышение биостойкости строительных изделий из древесины сосны путем обработки потоком низкотемпературной плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 172–179. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179. EDN: RTQDOW

ORIGINAL ARTICLE

IMPROVEMENT OF BIOLOGICAL RESISTANCE OF PINE WOOD BUILDING PRODUCTS USING LOW-TEMPERATURE PLASMA

Gennady G. Volokitin[1], Vladimir A. Cheremnykh[1], Aleksandr M. Adam[2], Yuri S. Sarkisov[1]
[1]*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*
[2]*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Abstract. Biological resistance of wood construction materials is one of the most important issues. Most often, specialized impregnations or coatings are used to protect wood from adverse factors. But the service life and operation conditions of impregnations and coatings are limited. As an alternative, it is proposed to treat the wood surface with low-temperature plasma.

Purpose: The surface treatment of pine wood products by low-temperature plasma and its effect on the biological resistance of treated products. The intensity of the fungi development on the product surface is investigated herein.

Research findings: The low-temperature plasma improves the biological resistance of pine wood products. The intensity of fungi development on the plasma-treated surface is lower than on the surface of un-treated wood and treated with specialized protective coating.

Keywords: low-temperature plasma, wood, biological resistance, plasma treatment, protective coating

Funding: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FEMN-2023-0003).

For citation: Volokitin G.G., Cheremnykh V.A., Adam A.M., Sarkisov Yu.S. Improvement of Biological Resistance of Pine Wood Building Products using Low-Temperature Plasma. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 172–179. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179. EDN: RTQDOW

Введение

Проблема биокоррозии особенно актуальна для конструкций из древесины. Повреждение плесневыми грибами приводит к снижению прочностных характеристик и эстетических свойств древесины [1]. И если в легкодоступных местах образование плесени на изделиях можно заметить и вовремя при-

нять меры, то в труднодоступных местах развитие неблагоприятных микроорганизмов может привести к выходу конструкции из строя [2, 3]. Поэтому для обеспечения расчетного срока службы деревянных конструкций необходимо предусмотреть защитные меры против образования и развития вредоносных микроорганизмов. На сегодняшний день наиболее часто для защиты древесины применяются специализированные пропитки. Они позволяют снизить интенсивность развития микроорганизмов на поверхности древесины. В качестве альтернативного метода повышения стойкости строительных изделий из древесины предлагается использовать обработку поверхности изделий потоком низкотемпературной плазмы [4]. Предполагается, что в результате термического воздействия происходит деструкция питательных для микроорганизмов веществ, за счет чего увеличивается стойкость к образованию плесени на поверхности [5].

Целью настоящей работы является изучение воздействия обработки поверхности сосновых изделий низкотемпературной плазмой на их биостойкость.

Материалы и методы исследования

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.050–2021, метод 1. Данный метод позволяет оценить биостойкость материала, основываясь на интенсивности роста плесневых грибов в условиях отсутствия дополнительного источника питания.

Образцы в виде пластин размером 50×50 мм и толщиной 10 мм были изготовлены из древесины сосны с влажностью 12 %, произрастающей в Томской области.

Для обработки древесины низкотемпературной плазмой использовалось специализированное оборудование [6] с плазменным генератором ВПР-410 мощностью 18,8 кВт, который обеспечивает удельный тепловой поток в $1{,}0 \cdot 10^6$ Вт/м². Сканирование поверхности обрабатываемых образцов проводилось со скоростью 0,074 м/с.

Образцы, обработанные потоком низкотемпературной плазмы, сравнивались с образцами, на поверхность которых было нанесено специализированное покрытие. В качестве специализированного покрытия был выбран состав «Акватекс» производства ООО «НПП Рогнеда» [7], как один из наиболее распространенных и относительно недорогих составов. Защитно-декоративное покрытие «Акватекс» содержит в составе антисептик и может применяться как снаружи, так и внутри нежилых и жилых помещений. Указанный срок службы этого покрытия может достигать 5 лет при условии, что будут соблюдены рекомендации производителя по эксплуатации обработанных изделий. Покрытие наносилось, согласно инструкции, в 3 слоя без предварительного грунтования.

Для приготовления суспензии использовался гриб Trichoderma virens, поскольку он способен к активной деструкции как целлюлозы, так и лигнина [8]. В качестве раствора для разведения суспензии применялась водопроводная вода, простерилизованная 30 мин при 1 атм. Стерилизация воды проводилась для исключения возможного заражения древесины спорами других грибов, находившихся в воде. Суспензия, разведенная в соотношении 1:15 согласно ГОСТ 9.048–89, наносилась на поверхность образцов с использованием

мелкодисперсного пульверизатора, при этом необходимо было избегать слияния капель.

Инфицированные и контрольные образцы помещали в чашки Петри и хранили в стеклянных эксикаторах, обеспечивая стабильные параметры температуры и влажности. После окончания выдерживания проводилась оценка биостойкости покрытия по интенсивности развития грибов на образцах по шкале ГОСТ 9.048–89.

Всего в работе рассматривалось 5 серий образцов с разной поверхностной обработкой:

– серия 1: исходная (необработанная) древесина без покрытий;

– серия 2: исходная (необработанная) древесина без покрытий с нанесенной на поверхность водой (для исключения возможного наличия спор различных грибов в древесине, использовавшейся для изготовления образцов);

– серия 3: исходная (необработанная) древесина без покрытий с нанесенной на поверхность суспензией;

– серия 4: древесина, обработанная потоком низкотемпературной плазмы, с нанесенной на поверхность суспензией;

– серия 5: древесина, обработанная специализированным антисептическим защитно-декоративным покрытием «Акватекс», с нанесенной на поверхность суспензией.

На рисунке представлены фотографии типичных образцов по окончании испытания. В таблице приведены результаты оценки биостойкости образцов, которые были подвергнуты различным методам обработки. Полученные данные позволяют провести сравнительный анализ эффективности применяемых защитных методов. Баллы в таблице отражают интенсивность развития грибов на поверхности образца и присваиваются согласно табл. 1 ГОСТ 9.048–89.

Результаты испытания образцов из сосны

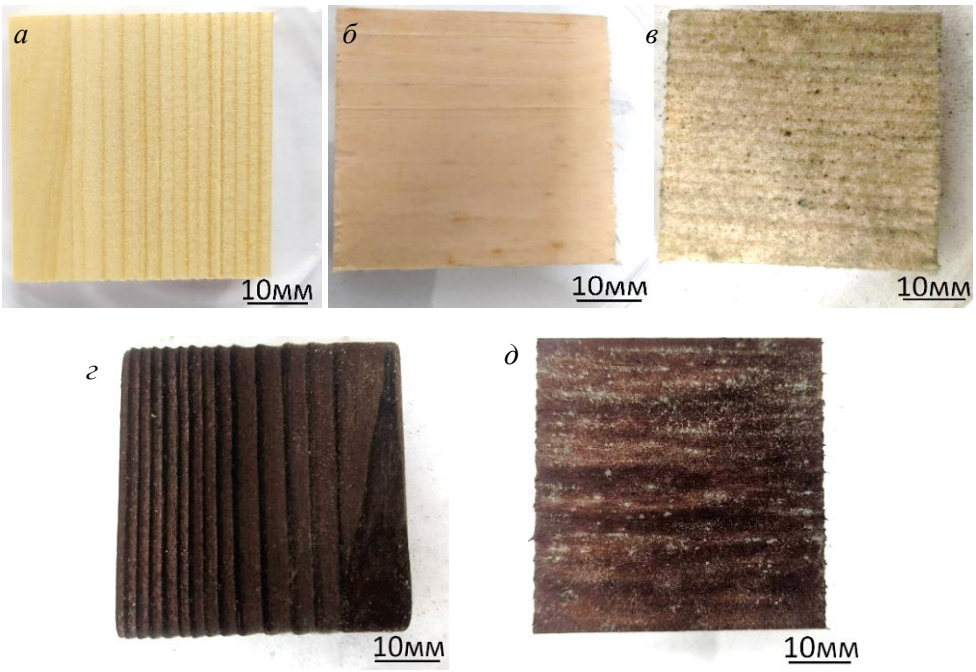
Test results of pine samples

№ п/п	Образец	Балл
1	Контрольный образец из исходной (необработанной) древесины	0
2	Образец из исходной древесины с нанесенной водой	0
3	Образец из исходной древесины с нанесенной суспензией	5
4	Образец из исходной древесины, обработанной низкотемпературной плазмой, с нанесенной суспензией	3
5	Образец из древесины, обработанной защитно-декоративным покрытием «Акватекс», с нанесенной суспензией	5

На контрольном образце и образце из исходной древесины с нанесенной водой следы развития грибов отсутствуют (рисунок, *а, б*), что подтверждает отсутствие спор грибов в исходной древесине и в воде, использовавшейся для приготовления суспензии. Интенсивность развития грибов на поверхности этих образцов, согласно табл. 1 ГОСТ 9.048–89, оценивается в 0 баллов.

На образце необработанной древесины с нанесенной суспензией спор грибов (рисунок, *в*) отчетливо видно развитие грибов равномерно по всей по-

верхности образца, что соответствует 5 баллам. На древесине, обработанной защитно-декоративным покрытием «Акватекс», с нанесенной суспензией (рисунок, *д*) развитие грибов менее интенсивно, чем на необработанной древесине с нанесенной суспензией. Однако прорастание спор отмечается по всей поверхности образца, также присутствуют локальные очаги развития мицелия общей площадью более 25 % от площади испытуемой поверхности образца, что также соответствует 5 баллам указанной ранее шкалы. На образце, обработанном потоком низкотемпературной плазмы, с нанесенной суспензией наблюдаются едва заметные локальные очаги развития мицелия (рисунок, *г*). Такая интенсивность развития оценивается в 3 балла.



Фотографии типичных образцов после испытания:

а – контрольный образец – исходная (необработанная) древесина без покрытий; *б* – образец исходной древесины, обработанный водой; *в* – образец исходной древесины с нанесенной суспензией; *г* – образец, обработанный потоком низкотемпературной плазмы, с нанесенной суспензией; *д* – образец, обработанный защитно-декоративным покрытием «Акватекс», с нанесенной суспензией

Photographs of wood samples after low-temperature treatment:

a – untreated wood without coating; *b* – wood sample treated with water; *c* – initial wood with deposited suspension; *d* – treated with low-temperature plasma with deposited suspension; *e* – treated with protective coating “Aquatex” with deposited suspension

Низкая интенсивность развития грибов на поверхности образцов, обработанных потоком низкотемпературной плазмы, связана с термодеструкцией питательной для грибков среды. При повышении температуры происходит разложение гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина в тонком верхнем слое древесины [5]. На глубине до 5 мм в древесине происходит уничтожение микроорга-

низмов за счет распределения температурных полей [9, 10]. Кроме того, в результате обработки потоком низкотемпературной плазмы происходит закупоривание пор на поверхности смолами, что затрудняет проникновение спор грибов вглубь древесины. При обработке защитно-декоративным покрытием «Акватекс» споры беспрепятственно проникают вглубь образца и начинают разрастаться изнутри. Поэтому интенсивность развития грибов на образцах, покрытых данным защитно-декоративным составом, выше, чем у образцов, обработанных потоком низкотемпературной плазмы.

Заключение

В ходе исследования было установлено, что обработка поверхности древесины низкотемпературной плазмой снижает интенсивность роста плесневых грибов. Это происходит за счет разрушения питательной среды для микроорганизмов и закупоривания пор древесины. Защитно-декоративные покрытия и пропитки не препятствуют проникновению спор грибов глубже пропитанной (защищенной) области.

Таким образом, степень защиты древесины существенно зависит от глубины проникновения защитного состава: чем глубже состав проникает в структуру древесины, тем более эффективной становится защита от различных негативных воздействий. Следовательно, изделия из древесины желательно обрабатывать на всю толщину. Глубокая пропитка древесины повышает себестоимость конечного продукта, поскольку увеличивается расход защитного состава и трудозатраты.

Таким образом, обработка древесины низкотемпературной плазмой может рассматриваться как альтернативный метод защитно-декоративной обработки.

Список источников

1. *Уголев Б.Н.* Древесиноведение и лесное товароведение. Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 351 с.
2. *Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А., Донских Т.С.* Защита древесины от влаги и гниения // Воронежский научно-технический вестник. 2014. Т. 3. № 4 (10). С. 68–73. EDN: TABHRZ
3. *Девятникова Л.А., Симонова А.А.* Влияние условий эксплуатации на разрушение конструкций жилых домов из древесины // Resources and Technology. 2020. Т. 17. № 3. С. 36–49. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5242
4. *Черемных В.А., Волокитин Г.Г., Клопотов А.А., Скрипникова Н.К.* Перспективы использования плазменных технологий в области создания и обработки строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 8 (764). С. 65–72. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-764-8-65-72
5. *Егорова А.Д.* Характерные особенности термодревесины как строительного материала // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 106-10. С. 38–43. DOI: 10.18411/trnio-02-2024-549
6. *Патент № 212821* Российская Федерация, МПК B27K 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2021139632 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 10.08.2022 / Волокитин Г.Г., Шеховцов В.В., Безухов К.А., Черемных В.А.
7. *Защитно-декоративное покрытие* для древесины «АКВАТЕКС 2в1» // Рогнеда : [сайт]. URL: https://www.rogneda.ru/catalog/zaschitnoe-pokrytie-dlya-drevesiny/aquatex/
8. *Алалыкин А.А., Кислицына О.В., Веснин Р.Л., Веретенникова Н.А. и др.* Новое средство для обработки древесины антисептического действия, включающее олигомерные про-

дукты химической деструкции полиэтилентерефталата // Химия растительного сырья. 2014. № 4. С. 243–249. DOI: 10.14258/jcprm.201404356

9. *Волокитин Г.Г., Устинова М.В., Черемных В.А.* Определение влияния различных видов термической обработки на механические свойства древесины сосны с учетом их себестоимости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 210–218. DOI 10.31675/1607-1859-2024-26-3-210-218
10. *Бондарцев А.С.* Пособие для определения домовых грибов / Акад. наук СССР. Ботан. ин-т им. В.Л. Комарова. Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, 1956. 80 с.

References

1. *Ugolev B.N.* Wood Science and Forest Commodity Science. Moscow, 2007. 351p. (In Russian)
2. *Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A., Donskikh T.S.* Wood Protection from Moisture and Rot. *Voronezhskii nauchno-tekhnicheskii Vestnik*. 2014; 3 (4 (10)): 68–73. (In Russian)
3. *Devyatnikova L.A., Simonova A.A.* Influence of Operating Conditions on Destruction of Wooden Houses. *Resources and Technology*. 2020; 17 (3): 36–49. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5242 (In Russian)
4. *Cheremnykh V.A., Volokitin G.G., Klopotov A.A., Skripnikova N.K.* Prospects of Plasma Technologies in Creation and Processing of Building Materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 8 (764): 65–72. (In Russian)
5. *Egorova A.D.* Thermally Modified Wood as a Building Material. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2024; (106-10): 38–43. DOI: 10.18411/trnio-02-2024-549 (In Russian)
6. *Volokitin G.G., Shekhovtsov V.V., Bezukhov K.A., Cheremnykh V.A.* Device for Surface Treatment of Wood Products with Low-Temperature Plasma. UMP Rus. Fed. No. 212821 U1. 2022. (In Russian)
7. Protective and decorative coating “Aquatex 2 in 1” for wood. Available: www.rogneda.ru/catalog/zaschitnoe-pokrytie-dlya-drevesiny/aquatex/ (In Russian)
8. *Alalykin A.A., Kislitsyna O.V., Vesnin R.L., Veretennikova N.A., et al.* New Wood Preservative with Oligomeric Products of Polyethylene Terephthalate Chemical Degradation. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2014; (4): 243–249. DOI: 10.14258/jcprm.201404356 (In Russian)
9. *Volokitin G.G., Ustinova M.V., Cheremnykh V.A.* Influence of Thermal Treatment on Mechanical Properties of Pine Wood with Regard to Prime Cost. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (3): 210−218. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-210-218 (In Russian)
10. *Bondartsev A.S.* Manual for Identifying House Fungi. Leningrad, 1956. 80 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vgg-tomsk@mail.ru

Черемных Владимир Алексеевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vacheremnykh@gmail.com

Адам Александр Мартынович, канд. биол. наук, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, adam@green.tsu.ru

Саркисов Юрий Сергеевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sarkisov@tsuab.ru

Authors Details

Gennady G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Ar-chitecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vgg-tomsk@mail.ru

Vladimir A. Cheremnykh, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vacheremnykh@gmail.com

Aleksandr M. Adam, PhD, Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, adam@green.tsu.ru

Yuri S. Sarkisov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architec-ture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sarkisov@tsuab.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 23.01.2025
Одобрена после рецензирования 03.02.2025
Принята к публикации 06.02.2025

Submitted for publication 23.01.2025
Approved after review 03.02.2025
Accepted for publication 06.02.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 180–193.

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 (1): 180–193.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 69.05
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-180-193 EDN: SRJTJS

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И БЕРЕЖЛИВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Константин Михайлович Крюков
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Технические требования к инвестиционно-строительным проектам возрастают, а распределение работ между многочисленными участниками сильно фрагментировано. Это приводит к тому, что строительные проекты выполняются с ненадежными графиками, перерасходом средств и дефектами, возникающими из-за отсутствия координации на строительной площадке. Бережливое управление строительством и информационное моделирование зданий являются возможными решениями этих проблем. Концептуальный анализ бережливого строительства и информационного моделирования зданий указывает на значительную синергию между ними, но они часто считаются отдельными технологиями и дают лишь частичные преимущества при самостоятельном применении.

Цель исследования заключается в разработке практических методов использования технологии 4D-моделирования в совокупности с методами бережливого строительства для уменьшения непроизводственных потерь и сокращения сроков строительства объектов.

Тематические исследования показали, что применение технологии информационного моделирования с бережливыми практиками на этапе строительства повышает эффективность планирования. Данный подход обеспечивает четкую визуализацию состояния работ на 3D-модели, а также объединяет несколько источников информации для создания по-настоящему интегрированной системы. Показано, как совместные методы бережливого производства и технологии информационного моделирования могут быть интегрированы на практике.

© Крюков К.М., 2025

***Ключевые слова*:** бережливое строительство, технология информационного моделирования, 4D-моделирование, Канбан, календарное планирование

Для цитирования: Крюков К.М. Практический подход к интеграции технологии информационного моделирования и бережливого строительства // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 180–193. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-180-193. EDN: SRJTJS

ORIGINAL ARTICLE

PRACTICAL APPROACH TO INTEGRATION OF BUILDING INFORMATION MODELING AND LEAN CONSTRUCTION

Konstantin M. Kryukov
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. Technical requirements for investment and construction projects are increasing, and work distribution among numerous participants is highly fragmented. This results in construction projects carried out with unreliable schedules, cost overruns and defects arising from the lack of coordination on the construction site. Lean construction management and building information modeling are possible solutions to these problems. The conceptual analysis of lean construction and building information modeling points to significant synergies between them, but they are often considered separate technologies and provide only partial benefits when applied independently.

Purpose: The development of practical methods of using 4D modelling together with lean construction methods to reduce non-productive losses and construction time.

Research findings: Case studies show that the use of building information modeling with lean construction improves the planning efficiency. This approach provides a clear visualization of the work status on a 3D model and combines multiple sources of information to create a truly integrated system. The paper presents how a combination of lean construction and building information modeling can be applied in practice.

Keywords: lean construction, building information modeling, 4D BIM, Kanban, scheduling

For citation: Kryukov K.M. Practical Approach to Integration of Building Information Modeling and Lean Construction. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 180–193. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-180-193. EDN: SRJTJS

Введение

Инвестиционно-строительные проекты становятся все более сложными в реализации из-за более жестких сроков выполнения, роста стоимости и требований к качеству, а также постоянных изменений в процессе исполнения. Основные проблемы, препятствующие завершению строительных проектов в срок с надлежащим качеством и в пределах бюджета, включают следующие аспекты:

– Отсутствие применения технология информационного моделирования (BIM). Согласно исследованиям, информационное моделирование зданий на стадии проектирования сокращает временные затраты при реализации инвестиционно-строительного проекта [1].

– Основой для расчета календарных планов строительства являются структура и объемы работ, определяемые вручную. С помощью таблиц Excel

рассчитываются нормы времени и продолжительность работ, что повышает риск возникновения ошибок. Кроме того, применяемые нормативы могут меняться в связи с внедрением современных технологий. Ошибки при определении объемов работ также приводят к согласованию большого количества дополнительных документов [2, 3].

– Неоперативный и неэффективный обмен данными между участниками проекта обусловлен отсутствием среды общих данных, что приводит к потерям времени. Недостаточная оперативность передачи информации между участниками проекта связана с тем, что исполнительная документация по проекту передается различными способами – через электронную почту, социальные сети, мессенджеры. Это приводит к утрате документов или созданию устаревших копий на компьютерах различных организаций [3].

– Потери времени возникают при выборе подрядчиков и составлении первоначальной ведомости объемов работ по объекту, которую подрядчики должны заполнить [2].

– Несогласованность действий. В процессе строительства возникают постоянные изменения проектных решений, которые влекут за собой изменение состава и объемов работ, а также сроков выполнения. Инициаторами таких изменений могут выступать как руководители проекта, так и субподрядчики. Однако не все участники проекта своевременно получают информацию об изменениях, что увеличивает сроки и затраты проекта [4].

Эти и другие проблемы приводят к увеличению сроков строительства и несвоевременному вводу объектов в эксплуатацию. Таким образом, необходимо усовершенствование системы управления сроками строительства объекта, а также координация различных действий на строительной площадке.

Гипотеза – интеграция технологии информационного моделирования на этапе 4D-моделирования с методами бережливого строительства позволит повысить эффективность строительного процесса. Представляется, что технология информационного моделирования способствует повышению достоверности информации, а бережливое строительство повышает надежность процессов управления информацией. Хотя эти технологии не зависят друг от друга, их интеграция на практике может обеспечить большие выгоды и преимущества по сравнению с их раздельным использованием [5].

Целью исследования является разработка практических методов применения технологии 4D-моделирования совместно с принципами бережливого строительства для снижения непроизводственных потерь и сокращения сроков возведения объектов.

Результаты исследования

Технология информационного моделирования

Информационная модель объекта капитального строительства – совокупность взаимосвязанных сведений, документов и материалов об объекте капитального строительства, формируемых в электронном виде на этапах выполнения инженерных изысканий, осуществления архитектурно-строительного проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта, эксплуатации

и (или) сноса объекта капитального строительства[1]. Технологию информационного моделирования можно определить как метод визуализации проекта и его пространств, конструкций, компонентов и материалов с их существенной информацией и свойствами [6]. Технологию информационного моделирования также можно понимать как набор технологий, процессов и политик, позволяющих нескольким заинтересованным сторонам совместно проектировать, строить и эксплуатировать объект в виртуальном пространстве [7].

Применение технологии информационного моделирования для проектирования и планирования строительных проектов включает 3D-модель объекта, 4D-планирование, оценку стоимости, анализ информационной модели местности, визуализацию проекта, инженерный анализ и др.

Технология 4D-моделирования включает в себя интеграцию временной составляющей в 3D-модель объекта. Тем самым создается пространственно-временная цифровая модель объекта, позволяющая визуализировать процесс строительства объекта. 4D-моделирование позволяет всем участникам инвестиционно-строительного проекта отслеживать ход строительства на цифровом двойнике строительства объекта в реальном времени, что помогает понимать текущую ситуацию и своевременно принимать управленческие решения.

Формирование 4D-моделей может осуществляться ручным способом путем передачи необходимой информации; на основе цифровой модели путем связывания 3D-элементов с работами календарно-сетевого графика; цифровая модель объекта капитального строительства импортируется в среду программного обеспечения 4D-моделирования [8]. В любом случае важной задачей является структурная декомпозиция работ. В первом и втором вариантах практически невозможно довести детализацию работ до уровня элементарных операций из-за их огромного количества. В процессе строительства информация будет непрерывно обновляться, и, соответственно, невозможно постоянно, практически вручную осуществлять корректировку.

Основная цель технологии информационного моделирования – управление всеми данными, связанными с проектом, в цифровом двойнике объекта. Основные допущения традиционной модели управления включают следующее:

– подход «сверху-вниз» к управлению основными этапами;

– приоритетность мероприятий определяется руководителем проекта (строительства);

– подрядчикам известен план производства работ;

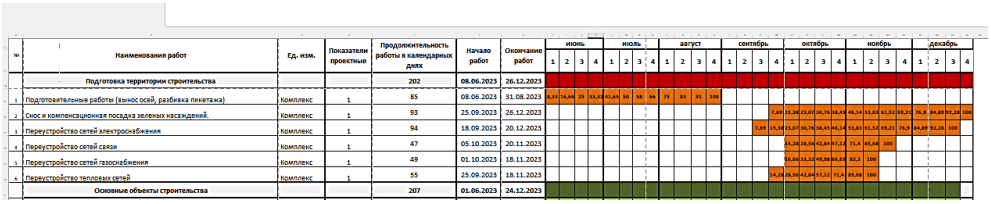
– работы можно точно спланировать;

– работы начинаются и заканчиваются согласно плану.

К сожалению, большинство из этих предположений обычно не реализуются. Технология 4D-моделирования способна предоставить целый ряд преимуществ, таких как улучшение понимания посредством визуализации структурных организационно-технологических связей и объектно-ориентированного моделирования графика работ. Однако если система управления остается традиционной, то даже поддержка 4D-модели не сможет обеспечить реальную выгоду проекту. Среди основных проблем можно выделить:

[1] Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.05.2024).

– Отсутствие у подрядных организаций специализированного программного обеспечения для календарного планирования. В основном календарные планы составляются в Excel, который изначально не предназначен для решения подобных задач. Пример фрагмента календарного плана на подготовительный период, разработанный в Excel, представлен на рис. 1.



№	Наименования работ	Ед. изм.	Показатели проектные	Продолжительность работы в календарных днях	Начало работ	Окончание работ	июнь				июль				август				сентябрь				октябрь				ноябрь				декабрь			
							1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Подготовка территории строительства			**202**	**08.06.2023**	**26.12.2023**																												
1	Подготовительные работы (вынос осей, разбивка пикетажа)	Комплекс	1	85	08.06.2023	31.08.2023	8,11	16,84	25	33,15	41,84	50	58	66	75	83	91	100																
2	Снос и компенсационная посадка зеленых насаждений.	Комплекс	1	93	25.09.2023	26.12.2023																7,69	15,38	23,07	30,76	38,45	46,14	53,83	61,52	69,21	76,9	84,59	92,28	100
3	Переустройство сетей электроснабжения	Комплекс	1	94	18.09.2023	20.12.2023															7,69	15,38	23,07	30,76	38,45	46,14	53,83	61,52	69,21	76,9	84,59	92,28	100	
4	Переустройство сетей связи	Комплекс	1	47	05.10.2023	20.11.2023																14,28	28,56	42,84	57,12	71,4	85,68	100						
5	Переустройство сетей газоснабжения	Комплекс	1	49	01.10.2023	18.11.2023																14,28	28,56	42,84	57,12	71,4	85,68	100						
6	Переустройство тепловых сетей	Комплекс	1	55	25.09.2023	18.11.2023																14,28	28,56	42,84	57,12	71,4	85,68	100						
	Основные объекты строительства			**207**	**01.06.2023**	**24.12.2023**																												

Рис. 1. Фрагмент календарного плана на подготовительный период
Fig. 1. Fragment of calendar plan for the preparatory period

– Отсутствие подхода к формированию структурной декомпозиции работ. При разработке сметной документации используются сборники единичных расценок с максимальной расшифровкой всех работ. В календарном плане работы сгруппированы по этапам, видам, комплексам. Данную группировку каждый подрядчик формирует самостоятельно. Отсутствует единый классификатор, который позволил бы сопоставить и синхронизировать данные цифровой модели и временные параметры проекта.

– Программное обеспечение, которое используется для разработки 4D-моделирования, не позволяет программными средствами группировать работы в виде, который необходим для подрядных организаций. Цифровая модель объекта формируется проектной организацией на стадии разработки проекта. Элементы 3D-модели, которые используются на стадии проектной документации для формирования календарного плана строительства, отличаются от элементов модели, которые используются при формировании календарного плана производства работ на стадии рабочей документации. Работы в календарном плане строительства сгруппированы укрупненно. Однако при производстве работ необходимо учитывать поточные методы производства работ, которые зависят от технологических возможностей подрядных организаций. Соответственно календарный план составляется разово, процесса планирования не происходит, план не используется для контроля хода реализации проекта, т. к. каждый раз это требует выполнения корректирующих действий по актуализации графика и группировке элементов (рис. 2).

Рис. 2. Календарный план строительства объекта
Fig. 2. Construction schedule of the object

Бережливое строительство

Для решения временных задач в строительстве предлагается применять методы бережливого производства. Основная концепция бережливого строительства заключается в определении, сокращении или ликвидации любых видов деятельности, которые не связаны с созданием добавочной стоимости. Такая деятельность может быть определена как потери, которые увеличивают затраты и сроки строительства. В различных научных источниках описаны инструменты бережливого производства, обладающие специфическими преимуществами для решения конкретных задач предприятия [9]. К таким техникам и инструментам можно отнести: Pull kanban system; The 5S process; Kaizen; Total Quality Management (TQM); Just in Time (JIT); Error Proofing (Poka-yoke); Total Productive maintenance (TPM); Last Planner System; Value Stream Mapping (VSM); Standardized Work; increased visualization; Fail Safe for Quality and Safety; Daily Huddle Meetings; First run studies; The Five Why's; Plan of Conditions and Work Environment in the Construction Industry (PCMAT); Concurrent Engineering; Target value design (TVD); Partnering; Computer Aided Design (CAD); Six Sigma [10].

В целях поддержки российских предприятий на федеральном уровне реализуется национальный проект «Производительность труда», направленный на повышение эффективности работы предприятий. Одним из направлений данного проекта является бережливое производство. Приоритетом для национального проекта являются предприятия несырьевых секторов экономики, в числе которых строительство, транспорт, обрабатывающая промышленность, сельское хозяйство, торговля и туризм. Общее число предприятий строительного сектора народного хозяйства составляет 361 735 (или 30 % от общего количества предприятий). Однако доля строительных предприятий по данному национальному проекту составила только лишь 6 % от общего числа участвующих организаций[2]. Как показывает практика уже реализованных проектов, использование методов бережливого производства способствует в основном увеличению объемов производства и сокращению сроков выполнения заказов[2]. Эти критерии являются жизненно важными для строительной отрасли.

В терминах национального проекта бережливое производство – это концепция управления производством и предприятием в целом, основанная на системе непрерывного совершенствования процессов и постоянном стремлении к устранению всех видов потерь в потоке создания ценности для клиента[3]. Бережливое строительство можно определить как усилия по принятию и применению принципов, инструментов и методов бережливого производства в контексте строительства.

В настоящем исследовании для решения поставленных задач использовалась технология Канбан, которая дополняет нереализованные возможности 4D-моделирования. Необходимость применения именно Канбан-системы обусловлена двумя ее основными принципами – визуализацией работ и возможностью управления потоком задач на уровне строительной площадки. Канбан

[2] Производительность труда. 2024. II квартал. № 21. 32 с. URL: https://storage.cloud.croc.ru/fcc/portal/media/journal/issues/Журнал_20_2_квартал_2024_года.pdf
[3] URL: https://xn--b1aedfedwqbdfbnzkf0oe.xn--p1ai/national-project/glossary/

отображает, какие работы должны быть выполнены, какие находятся в процессе выполнения, а какие уже завершены. При этом основное внимание уделяется работам, которые не были выполнены в соответствии с календарным графиком. Ответственные лица имеют возможность визуально отслеживать выполнение данных работ до их завершения. Наглядность позволяет определить, в какой стадии находится решение задачи.

Основным элементом системы Канбан является канбан-доска, используемая в качестве инструмента визуализации и оптимизации производства работ [11]. Это доска с колонками и карточками, которая может быть физической и цифровой. На карточках отражаются работы, а колонки представляют собой их статусы. На канбан-доске может быть любое количество колонок, но для решения поставленных задач предлагается три этапа: «Запланировано», «В работе» и «Готово». По мере изменения статуса работы карточка перемещается в соответствующую колонку, пока не достигнет столбца с завершёнными задачами. Карточки Канбан содержат наглядную информацию о работах, ответственных лицах и сроках выполнения. На виртуальных досках Канбан может быть добавлена дополнительная информация, помогающая лучше управлять процессом (фото, акты, техническая документация и др.).

Предлагаемый практический подход

Интеграция технологии информационного моделирования и принципов бережливого строительства на стадиях планирования и выполнения строительно-монтажных работ сочетает в себе подход планирования «сверху-вниз» с совместной оценкой вариативности выполняемых работ «снизу-вверх». Результатом являются более реалистичные графики, основанные на практическом опыте [12].

Поскольку планированием и контролем должны управлять руководители разных уровней, необходимо установить иерархическую структуру работ для каждого уровня. Предлагается структурировать календарный план производства работ на несколько уровней. На стратегическом уровне планирование и контроль выполнения осуществляются по ключевым этапам строительства объекта. Этот уровень ориентирован на высшее руководство участников инвестиционно-строительного проекта. С использованием 4D-моделирования руководители могут визуально отслеживать на цифровой модели объекта капитального строительства ход выполнения работ.

На среднем уровне ежемесячного планирования необходима детализация по видам работ по исполнителям: генподрядчикам и субподрядчикам. В данный процесс должны быть вовлечены специалисты производственно-технических отделов подрядчика. Контроль выполнения планов осуществляется на уровне руководителей среднего звена подрядных организаций. На данном этапе производится корректировка планов в 4D в соответствии с информацией, поступившей со строительной площадки.

На низшем уровне управления на строительной площадке 4D-моделирование теряет свою эффективность. Причин может быть несколько: сложность детального структурирования календарного плана производства работ, отсутствие соответствующего программного обеспечения, дефицит времени и ре-

сурсов для ежедневной корректировки графиков работ и т. п. [13]. Поэтому на уровне строительной площадки предлагается реализовать методы Канбан. Полученные данные затем могут быть переданы на средний уровень (например, производственно-технический отдел) для дальнейшей корректировки планов и принятия управленческих решений.

Предлагаемый алгоритм действий представлен на рис. 3.

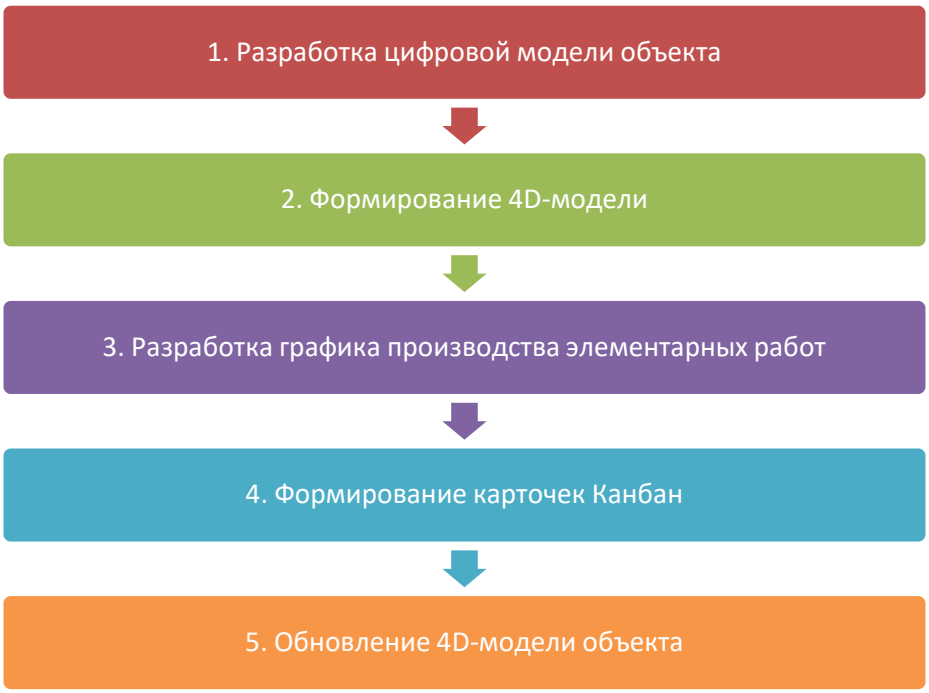


Рис. 3. Алгоритм внедрения технологий информационного моделирования и инструментов системы бережливого строительства Канбан

Fig. 3. Algorithm of implementation of information modeling and tools of Kanban lean construction system

1. В процессе разработки проектной документации формируется цифровая модель объекта капитального строительства в 3D. На рис. 4 представлен фрагмент цифровой модели каркасно-монолитного жилого дома.

2. В соответствии с цифровой 3D-моделью разрабатывается календарный план производства работ в виде 4D-модели, в котором структурная иерархия работ должна предусматривать несколько уровней мониторинга процесса строительства. Первоначально на стадии разработки проектной документации в составе раздела «Проект организации строительства» происходит укрупненное планирование строительства объекта проектной организацией. В дальнейшем на стадии проекта производства работ календарный план детализируется на основе разработанной цифровой 3D-модели. Применение среды общих данных при проектировании обеспечивает централизованное хранение информации, содержащейся в регулярно обновляемой строительной цифровой модели.

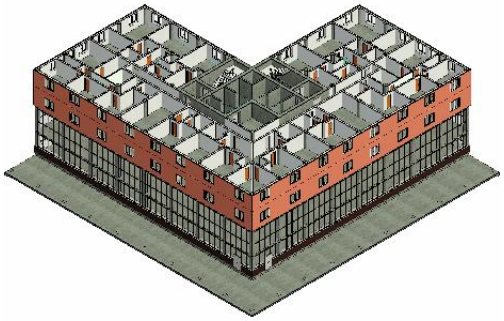


Рис. 4. Фрагмент цифровой модели объекта
Fig. 4. Fragment of the digital model of the object

Наибольшее распространение в проектных организациях при создании 3D-модели получил программный комплекс Autodesk Revit (58,8 % от общего количества использующих технологию информационного моделирования по данным портала ерз.рф). На основе модели, разработанной с помощью данного программного обеспечения, в Autodesk Navisworks можно создать 4D-модель строительства объекта, сгруппировав все работы по этапам календарного плана. После выполнения организационно-технологической увязки этапов строительства формируется визуализация всего строительного процесса. Полученный календарный план может применяться для реализации целей 4D-моделирования на высоком уровне, включая заказчиков, менеджеров проектов.

3. В соответствии с разработанной 4D-моделью для производства элементарных работ создается график производства работ на строительной площадке (рис. 5).

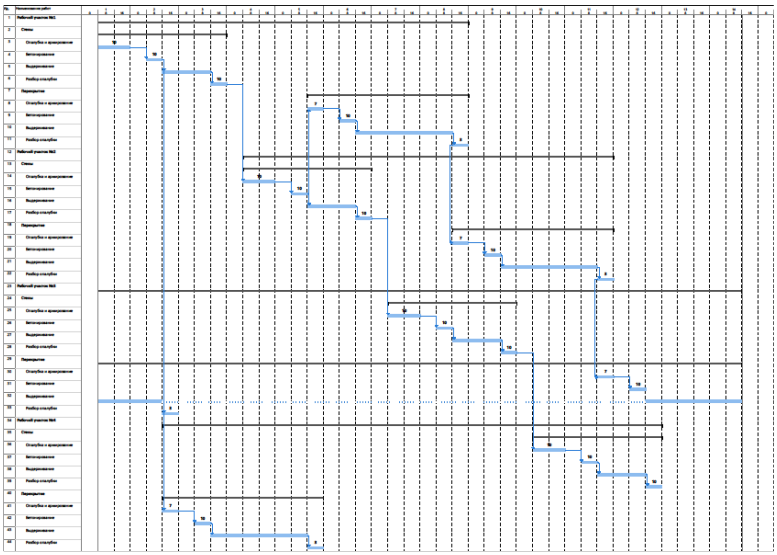


Рис. 5. График производства монолитных работ по объекту
Fig. 5. Schedule of monolithic works

4. В целях контроля и выполнения запланированных работ применяются инструменты бережливого строительства системы Канбан. На строительной площадке подготавливается канбан-доска. На основании недельно-суточного планирования подрядные организации ежедневно отражают информацию о ходе строительных работ на доске планирования. Каждая элементарная или составная работа связана с цифровой моделью с помощью соответствующего элемента. Записи данных, полученные в процессе планирования, передаются на строительную площадку, в том числе в виде канбан-карточек. Каждая такая карточка – это ежедневная цель для работы исполнителя на объекте. В них отображаются сведения о начале и окончании работ, идентификатор в соответствии с цифровой моделью, а также процент выполнения работы. Изначально канбан-карточки представляют собой физические листы. Со временем, по мере внедрения цифровых технологий в организацию, они могут стать электронными.

Такой подход облегчает оперативное управление и контроль выполнения работ. Регулярное обновление статуса текущих процессов и действий позволяет своевременно выявлять проблемы и ограничения, определяя ключевые показатели эффективности. На рис. 6 приведены распечатанные канбан-карточки, которые связывают цифровой двойник с реальным объектом.

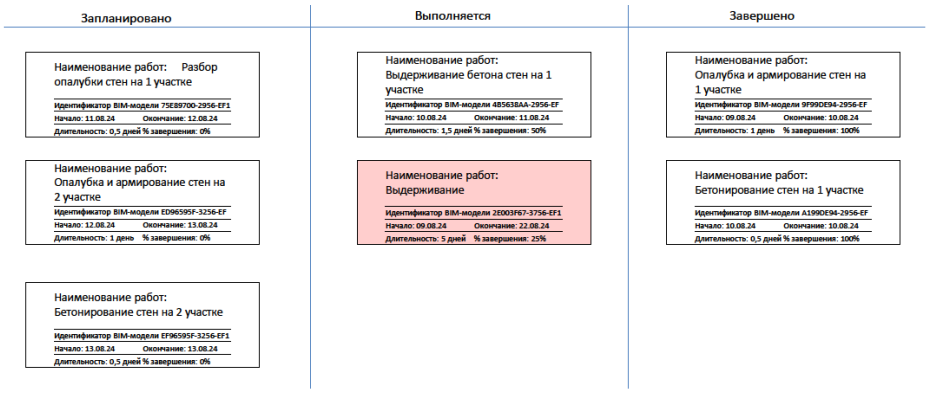


Рис. 6. Фрагмент доски Канбан
Fig. 6. Kanban board fragment

Запланированные к выполнению работы выбираются в 3D-модели с помощью идентификатора цифрового двойника. В результате выбора отображается цветовое кодирование. На рис. 7 показано, как элементы, выбранные в рамках 3D-модели, отображаются цветом. Участники проекта делают выбор вручную на основе планирования процесса.

В соответствии с процедурами системы Канбан проводятся ежедневные совещания, целью которых является анализ причин отклонений от запланированных показателей. Поскольку в карточках представлены цели на один день, информация о ходе строительства обновляется ежедневно. Это позволяет своевременно вносить коррективы и улучшения в процесс строительства. На основании карточек Канбан, работы по которым были начаты или завершены, обновляется информация в системе управления данными. Таким образом, происходит обнов-

ление текущего статуса и хода выполнения работ. Заполненные карточки подлежат проверке во время ежедневного контроля, что обеспечивает достоверность и актуальность наборов данных перед выполнением дальнейших операций.

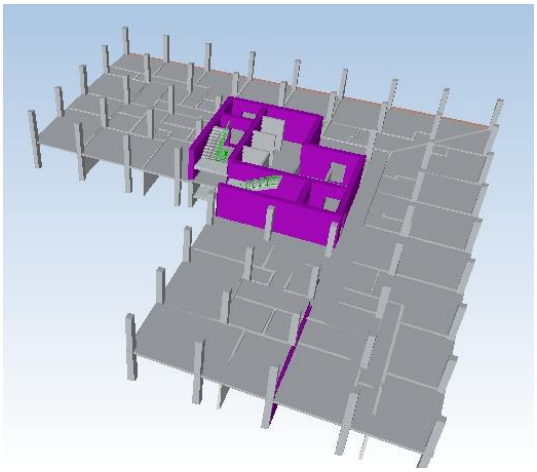


Рис. 7. Отображение планируемых к выполнению элементов цифровой модели объекта
Fig. 7. Digital model elements of object for implementation

5. Обновление 3D-модели дает возможность визуализировать задачи, которые были начаты, выполняются или уже завершены. Это позволяет в режиме реального времени на цифровом двойнике объекта строительства выявлять допущенные отклонения от плана производства работ. Визуализация процесса строительства способствует внедрению системы систематического улучшения и повышению производительности работ по проекту. На рис. 8 показано взаимодействие между 3D-моделью цифрового двойника и реальной строительной площадкой, которое в основном обеспечивается с помощью карточек Канбан. Цветами выделены работы, которые были выполнены за определенный период времени.

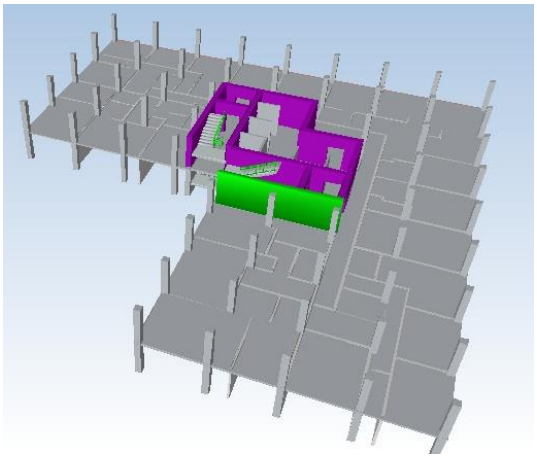


Рис. 8. Визуализация выполненных работ на цифровом двойнике объекта
Fig. 8. Visualization of complete work on a digital twin of the object

Такое взаимодействие позволяет ответственным лицам своевременно получать более точную информацию в целях повышения производительности. Традиционная модель управления «сверху-вниз» сменяется новой моделью совместного взаимодействия, позволяющей использовать преимущества знаний и опыта специалистов на всех уровнях управления. Задержки, непредвиденные обстоятельства, резервы и время простоя отображаются в режиме реального времени, что способствует постоянному совершенствованию строительных процессов.

Заключение

В исследовании было продемонстрировано, что интеграция технологии информационного моделирования и инструментов бережливого строительства значительно облегчает обмен информацией между производственными процессами на строительной площадке и управлением работами и ресурсами. Систематический сбор и анализ полученных данных играют ключевую роль в улучшении общего процесса управления проектом. На данный момент было разработано и протестировано несколько технологических концепций, к которым можно отнести:

– формирование заданий на строительство с применением канбан-карт;

– использование количественных показателей на основе цифровой модели в целях планирования материально-технических ресурсов на основе оперативных данных;

– организация и проведение обучения по цифровому календарному планированию строительства.

Одна из ключевых текущих задач – унификация структуры работ и автоматическая привязка информации, связанной с выполнением задач, к отдельным элементам цифровой модели для упрощения совместной работы над проектом. Внедрение и систематическое использование технологии информационного моделирования в сочетании с элементами бережливого строительства на строительной площадке позволят формировать корректные данные для принятия управленческих решений. Пользователи отмечают удобство и простоту применения предложенного подхода. В заключение можно констатировать, что систематическая интеграция технологии информационного моделирования и бережливого строительства делает информацию о ходе строительства своевременно доступной и корректной. Это способствует эффективной коммуникации между отдельными участниками проекта и положительно влияет на управление строительством объекта.

В целях дальнейшего совершенствования процессов управления строительством планируется разработка программного обеспечения для создания и работы с web-картами Канбан (включая мобильные приложения). Это позволит автоматизировать процессы обработки полученных данных, минимизируя ошибки, связанные с человеческим фактором при ручном вводе информации.

Список источников

1. *Хмура В.В., Миронова Н.В., Клыков М.С.* Модели календарного планирования в рамках информационного моделирования строительства // Научно-техническое и экономическое

сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием (Хабаровск, 18–21 апреля 2023 г.). В 2 томах. Том 1 / под ред. И.В. Игнатенко. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2023. С. 534–537. ISBN 978-5-262-00948-0 (т. 1).

2. *Ушакова Е.А.* Анализ продолжительности выполнения строительных процессов с учетом показателей организационно-технологической надежности строительного производства // Современное строительство и архитектура. 2022. №. 3 (27). С. 24–28. DOI: 10.18454/mca.2022.27.3. EDN: FTODFH
3. *Залипаева О.А.* Анализ отклонений сроков выполнения работ (на примере строительства набережных) // Управление и экономика народного хозяйства России : сборник статей VII Международной научно-практической конференции, 21–22 февраля 2023 г. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2023. С. 144–148.
4. *Никоноров С.В., Мельник А.А.* Повышение организационно-технологической надежности строительства в современных условиях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Т. 19. № 3. С. 19–23. DOI: 10.14529/build190303
5. *Sacks R., Radosavljevic M., Barak R.* Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction // Automation in Construction. 2010. V. 19. P. 641–655. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.02.010
6. *Fosse R., Ballard G., Fischer M.* Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice // Proc. Lean & Computing in Construction Congress (LC3). 2017. V. 1. P. 499–506. DOI: 10.24928/2017/0159
7. *Bolpagni M., Burdi L., Ciribini A.* The Implementation of Building Information Modelling and Lean Construction in Design Firms in Massachusetts // 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion, Greece, 2017. P. 235–242. DOI: 10.24928/2017/0310
8. *Нечипорук Я., Башкова Р.* Краткий обзор 4D-моделирования в строительстве // Архитектура. Строительство. Образование. 2020. №. 1. С. 35–41. DOI: 10.18503/2309-7434-2020-1(15)-35-41. EDN: QOXTIE
9. *Aslam M., Gao Z., Smith G.* Framework for selection of lean construction tools based on lean objectives and functionalities // International Journal of Construction Management. 2020. V. 22. P. 1–12. DOI: 10.1080/15623599.2020.1729933
10. *Sarhan J., Xia B., Fawzia S., Karim A.* Lean Construction Implementation in the Saudi Arabian Construction Industry // Construction Economics and Building. 2017. V. 17. P. 46–69. DOI: 10.5130/AJCEB.v17i1.5098
11. *Брянцева Т.А., Никулина А.С., Шелякин С.В.* Инновационные системы управления российскими предприятиями // Белгородский экономический вестник. 2020. № 3 (99). С. 54–62. EDN: YDWFBX
12. *Ghosh S., Burghart J.* Lean Construction: Experience of US Contractors // International Journal of Construction Education and Research. 2019. V. 17. P. 1–21. DOI: 10.1080/15578771.2019.1696902
13. *Mano A., Gouvea da Costa S., Pinheiro de Lima E.* Criticality assessment of the barriers to Lean Construction // International Journal of Productivity and Performance Management. 2020. V. 70:1. P. 65–86. DOI: 10.1108/IJPPM-11-2018-0413

References

1. *Khmura V.V., Mironova N.V., Klykov M.S.* Models of Calendar Planning in Information Building Modeling. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Scientific, Technical and Economic Cooperation of Asia-Pacific Countries in the 21st Century'*, in 2 vol. Vo1. 1. I.V. Ignatenko (Ed.). Khabarovsk 2023. Pp. 534–537. ISBN 978-5-262-00948-0. (In Russian)
2. *Ushakova E.A.* Analysis of Construction Duration with Regard to its Reliability. *Sovremennoe stroitel'stvo i arkhitektura*. 2022; 3 (27): 24–28. DOI: 10.18454/mca.2022.27.3. EDN: FTODFH (In Russian)
3. *Zalipaeva O.A.* Analysis of Work Schedule Deviations (on the Example of Embankment Construction). In: *Proc. 7th Int. Sci. Conf. 'Economy Management in Russia'*, Penza, 2023. Pp. 144–148. (In Russian)

4. *Nikonorov S.V., Mel'nik A.A.* Improvement of Organizational and Technological Reliability of Construction in Modern Conditions. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2019; 19 (3): 19–23. DOI: 10.14529/build190303 (In Russian)
5. *Sacks R., Radosavljevic M., Barak R.* Requirements for Building Information Modeling Based on Lean Production Management Systems for Construction. *Automation in Construction*. 2010; 19: 641–655.
6. *Fosse R., Ballard G., Fischer M.* Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice. In: *Proc. Lean & Computing in Construction Congress (LC3)*. 2017, vol. 1. Pp. 499–506. DOI: 10.24928/2017/0159
7. *Bolpagni M., Burdi L., Ciribini A.* The Implementation of Building Information Modelling and Lean Construction in Design Firms in Massachusetts. 2017; 235-242. DOI: 10.24928/2017/0310
8. *Nechiporuk Ya., Bashkova R.* A Brief Overview of 4D Modeling in Construction. *Arkhitektura. Stroitel'stvo. Obrazovanie*. 2020; (1): 35–41. DOI: 10.18503/2309-7434-2020-1(15)-35-41. EDN: QOXTIE (In Russian)
9. *Aslam M., Gao Z., Smith G.* Framework for Selection of Lean Construction Tools Based on Lean Objectives and Functionalities. *International Journal of Construction Management*. 2020; 22: 1–12. DOI: 10.1080/15623599.2020.1729933
10. *Sarhan J., Xia B., Fawzia S., Karim A.* Lean Construction Implementation in the Saudi Arabian Construction Industry. *Construction Economics and Building*. 2017; 17: 46–69. DOI: 10.5130/AJCEB.v17i1.5098
11. *Bryantseva T.A., Nikulina A.S., Shelyakin S.V.* Innovative Management Systems of Russian Enterprises. *Belgorodskii ekonomicheskii vestnik.* 2020; 3 (99): 54–62. EDN: YDWFBX (In Russian)
12. *Ghosh S., Burghart J.* Lean Construction: Experience of US Contractors. *International Journal of Construction Education and Research*. 2019; 17: 1–21. DOI: 10.1080/15578771.2019.1696902
13. *Mano A., Gouvea da Costa S., Pinheiro de Lima E.* Criticality Assessment of the Barriers to Lean Construction. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2020; 70 (1): 65–86. DOI: 10.1108/IJPPM-11-2018-0413

Сведения об авторе

Крюков Константин Михайлович, канд. экон. наук, доцент, Донской государственный технический университет, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, kkrioukov@gmail.com

Author Details

Konstantin M. Kryukov, PhD, A/Professor, Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., 344003, Rostov-on-Don, Russia, kkrioukov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.08.2024
Одобрена после рецензирования 19.11.2024
Принята к публикации 17.01.2025

Submitted for publication 20.08.2024
Approved after review 19.11.2024
Accepted for publication 17.01.2025

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. № 1. С. 194–202.

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 (1): 194–202.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 624.21.014.072
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-194-202 EDN: TMXROP

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ НЕСУЩИХ БАЛОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ

Владимир Михайлович Картопольцев[1],
Андрей Владимирович Картопольцев[2]
[1]*Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия*
[2]*ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Многокритериальное прогнозирование эксплуатационной надежности несущих элементов пролетных строений мостов на основе комплексного применения механических и энергетических критериев, а также элементов теории катастроф определяет актуальность проблемы.

Многокритериальное прогнозирование надежности несущих элементов пролётных строений мостов представляет собой расширение использования элементов теории катастроф на основе механических и энергетических критериев.

Цель: рассмотреть многокритериальное прогнозирование надежности мостовых конструкций в процессе термодинамического состояния и приспособляемости материала, элементов и конструкций в целом в течение длительного эксплуатационного периода.

Результаты: на основе равновесных состояний, характеризующих и сопровождающих мгновенность деформационно-катастрофического процесса, определены управляющие параметры процесса прогнозирования надёжности.

© Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., 2025

Ключевые слова: надежность, критерии, балка, случайные величины, прочность, пролетное строение, нагрузка

Для цитирования: Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Многокритериальное прогнозирование эксплуатационной надежности несущих балок металлических мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 194–202. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-194-202. EDN: TMXROP

ORIGINAL ARTICLE

MULTI-CRITERIA PREDICTION OF SERVICE RELIABILITY OF LOAD-BEARING BEAMS OF METAL BRIDGES

Vladimir M. Kartopoltsev[1], Andrey V. Kartopoltsev[2]
[1]*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*
[2]*OOO "DIAMOS", Tomsk, Russia*

Abstract. Multi-criteria prediction of the service reliability of load-bearing elements based on the application of mechanical and energetic criteria and theory of catastrophes, determines the relevance of the study. Multi-criteria prediction of the service reliability of load-bearing elements of bridge spans is an expansion of understanding and use of elements of catastrophe theory based on mechanical and energy criteria.

Purpose: The aim of this work is to consider multi-criteria prediction of the service reliability of bridge structures in thermodynamic state and adaptability of the material, elements and structures as a whole during a long operational period.

Research findings: Control parameters of the reliability forecasting process are determined based on equilibrium states, characterized and accompanying the instantaneousness of the deformation-catastrophic process.

Keywords: service reliability, criteria, beam, random variables, strength, span, load

For citation: Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V. Multicriteria Prediction of Service Reliability of Load-Bearing Beams of Metal Bridges. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 194–202. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-194-202. EDN: TMXROP

В условиях многокритериальности прогнозирования надежности конструкций мостов наблюдается скачкообразное изменение управляющих параметров функции, описывающей состояние элементов или конструкции балки в целом. Такой подход учитывает резервирование и восстановление с определением зависимости между числом управляющих параметров (например, вертикальной стенки в бистальной балке) и числом катастроф за счет выхода этого элемента за предел «исправных» [1]:

число управляющих параметров (n) 1, 2, 3
число видов катастроф (m) 1, 2, 5

Примечание. n: 1 – параметр нагрузки; 2 – предельное состояние; 3 – задержка пластических деформаций и резервирование; m: 1 – частичная потеря несущей способности; 2 – достижение предельного состояния с частичной бифуркацией упругопластического состояния; 5 – поэлементный выход из работы – запредельное состояние – выход за предел «исправных».

Функция плотности вероятности распределения чувствительности элемента к состоянию при нормальном законе распределения со значением среднего квадратичного отклонения ($\bar{\sigma}$) графически представлена на рис. 1 [2, 3].

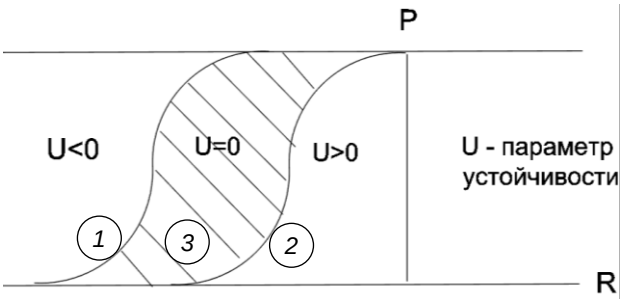


Рис. 1. Модель катастрофы элемента в зависимости от функции плотности распределения вероятности *R*:
1 – зона устойчивого состояния; *2* – зона неустойчивого состояния; *3* – зона опасности (возможного проявления несовершенств), характеризуемая коэффициентом γ_ψ

Fig. 1. Catastrophe model depending on the probability density function *R*:
1 – stable state zone; *2* – unstable state zone; *3* – zone of danger of possible manifestation of imperfections characterized by the coefficient γ_ψ

При составлении уравнения равновесия используется свойство потенциальной энергии, которое принимает в состоянии равновесия экстремальное значение $\Pi = \Pi_{max}$, при этом, согласно постулату Лежёна Дирихле[1], устойчивому состоянию отвечает min потенциальной энергии $U < 0$, неустойчивому – max $U > 0$, расстояние между ними – постоянное или нулевое значение $U = 0$. При переходе из одного состояния в другое возникают качественно новые функциональные свойства системы:

– перераспределение напряжений;

– регулирование напряженно-деформированного состояния системы;

– самоорганизация процесса.

Самоорганизующаяся система – это система, которая без какого-то специфического воздействия извне приобретает новую пространственную, временную или функциональную структуру. Для стальных балок такой самоорганизующей силой может выступить упругопластическое деформирование.

Принципом, акцентирующим количественную сторону самоорганизации процесса, является принцип хрупкости аналитической оценки чувствительности к несовершенствам в форме трещинообразования, тем самым ограничивающий зону дискретной или континуальной устойчивости в цепочке событий «устойчивость – катастрофа» [4]. Тогда любое изменение надежности, определяемое отношением $\frac{\gamma_i}{\gamma_0} = -e^{\lambda \cdot t}$ к отношению прочностных свойств и нагруженности (R_t) для несущих балок, представляется функционалом несовершенства конструкции (ψ) в виде

[1] Дирихле П.Г.Л. Об устойчивости равновесия // Аналитическая механика. Том 1 / Ж. Лагранж. Москва; Ленинград: ГИТТЛ, 1950. 594 с.

$$\psi = 1 - \sqrt{\text{к}_\text{ф} \cdot f \cdot \lambda_{Rt}}\,, \qquad (1)$$

где λ_{Rt} – коэффициент прочности; f – параметр несовершенств элементов; $\text{к}_\text{ф}$ – коэффициент формы сечения элемента [5, 6], равен $\dfrac{1}{\dfrac{A \cdot h^2}{4J} + 1}$ или:

– для двутаврового сечения – 0,63;

– для прямоугольного – 0,75.

В мостовых конструкциях параметр несовершенства адекватен коэффициенту повреждаемости $\psi \cong \varepsilon$, где ε – мера повреждаемости.

В этом случае вероятностная задача оценки меры чувствительности элемента балки к несовершенствам оценивается следующими значениями ψ: для балок двутаврового сечения ψ = 0,7; для балок коробчатого сечения ψ = 0,3–0,6. Решение задачи оценки чувствительности к проявлению несовершенств на основе случайных величин подчиняется условию «неустойчивость – переход к устойчивому состоянию» и представляет единый процесс количественной и качественной саморегуляции системы, сопровождающейся перестройкой из одного состояния надежности $P \approx 0{,}999$ ψ = 1 в другое $P \approx 0{,}69$–$0{,}70$ ψ = 0,7. Для изгибаемых элементов пролетных строений металлических мостов, в зависимости от предельного состояния, значение ψ рекомендуется определять по формуле

$$\psi = 1 - \frac{0{,}80}{(S \cdot \bar{\sigma})^{2/3}}\,, \qquad (2)$$

где S – коэффициент, зависящий от геометрических размеров и свойств материала: в упругой стадии работы $S = S_{\text{упр}} = 1 - 0{,}84\sqrt{\dfrac{E}{\sigma y}}$; в упругопластической стадии $S = S_{\text{уп.пл}} = 1 - 0{,}84\sqrt{\dfrac{E}{\sigma_T}}$.

При накоплении повреждений – фактор проявления несовершенств материала и конструкции при динамических воздействиях – функция разрушения будет записана в виде

$$\Phi_\text{д} = D_i - D_{(t)}\,, \qquad (3)$$

где D_i – объем повреждений усталостного характера, вызывающих разрушение элемента; $D_{(t)}$ – накопление за время t повреждений.

При стационарном режиме динамического нагружения значение $D_{(t)}$ может быть представлено равенством [7]:

$$D_{(t)} = \frac{1}{c}\sum_{i=1}^{Vi(t)} \sigma_i^{\,3}\,, \qquad (4)$$

где $V_{i(t)}$ – суточная интенсивность движения транспорта по мосту; σ_i – диапазон напряжений в элементах от проходящего по мосту транспорта (размах); t – срок эксплуатации в днях.

Единственные нормирующие показатели системы многокритериального прогнозирования надежности стальных балок пролетных строений металлических мостов запишутся следующим образом:

– γ_m – коэффициент надежности по материалу: для стали 16Д – 1,09; 15ХСНД – 1,164; 10ХСНД – 1,125 [8];

– γ_{fi} – коэффициент по нагрузке конструкции, определяется в соответствии с СП 35.13330.2011. «Свод правил. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*» и состоит из коэффициента статической нагрузки γ_{fis} и динамической нагрузки γ_{fid}, которые равны:

$$\left.\begin{aligned}\gamma_{fis} &= 1 + s \cdot \gamma_c \cdot V_{\text{ст}};\\ \gamma_{fid} &= 1 + s \cdot \gamma_c \cdot V_{di},\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

где
$$s = \frac{(\sigma_{\text{ст}}^2 + \sigma_i^2)^{3/2}}{\sigma_{\text{ст}} + \sigma_i};$$

– γ_c – коэффициент надежности по нагрузке для каждого элемента сечения балки, $\gamma_c = \frac{(\sigma_{\text{ст}}^2 + \sigma_i^2)}{\sigma_{\text{ст}} + \sigma_i}$; $\sigma_{\text{ст}}$ – среднеквадратичное отклонение для статической нагрузки; σ_i – среднеквадратичное отклонение для динамической нагрузки; $V_{\text{ст}}$ – среднестатистическая статическая нагрузка на балку, распределенная по нормальному закону; V_d – среднестатистическая динамическая нагрузка, распределенная по нормальному закону; $V_{\text{ст}i}$ – коэффициент вариации для статической нагрузки, $V_{\text{ст}i} = \frac{V_{\text{ст}}}{\sigma_{\text{ст}}}$; V_{di} – коэффициент вариации для динамической нагрузки, $V_{di} = \frac{V_d}{\sigma_i}$;

– γ_s – коэффициент безопасности, равный отношению среднего значения прочности элемента $R_{\text{ср}}$ к среднему значению напряжения в элементе $\sigma_{\text{ср}}$:

$$\gamma_s = \frac{R_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{ср}}} \geq 1;$$

– $\gamma_з$ – коэффициент запаса прочности,

$$\gamma_з = \gamma_s - 1 = \frac{R_{\text{ср}} - \sigma_{\max}}{\sigma_s};$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ср}} + \beta \cdot \sigma_{S\sigma}; \quad \beta = 3\text{–}6,$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение в элементе; $\sigma_{s\sigma}$ – среднеквадратичное отклонение по напряжению; σ_s – среднеквадратичное отклонение по прочности;

– $\gamma_{зt}$ – коэффициент запаса прочности по времени (коэффициент долговечности) [9]:

$$\gamma_{зt} = \frac{t_{\text{разр}}}{t}, \qquad (6)$$

где $t_{\text{разр}}$ – время возможного разрушения конструкции или элемента при напряжении $\sigma = \sigma_i$; t – время эксплуатации конструкции (ресурсный период);

– γ_σ – коэффициент запаса по напряжениям, $\gamma_\sigma = \dfrac{\sigma_{разр}}{\sigma_i}$; $\sigma_{разр}$ – напряжение разрушения; σ_i – текущее напряжение;

– $\gamma_н$ – коэффициент надежности по назначению (СП 35.13330.2011. «Свод правил. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*»);

– γ_ψ – коэффициент несовершенства материала и конструкции;

– γ_V – коэффициент сплошности, $\gamma_V = \dfrac{1}{\gamma_\psi}$ [10, 11].

Универсальный коэффициент многокритериального прогнозирования надежности равен:

$$\gamma_i = \gamma_m \cdot \gamma_{fi} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_з \cdot \gamma_{зt} \cdot \gamma_\sigma \cdot \gamma_\psi \cdot \gamma_н \cdot \gamma_c \cdot \gamma_V \,. \qquad (7)$$

С использованием экспоненциального закона распределения случайных величин выражение надежности будет иметь вид

$$P_{\gamma i} = \gamma_i \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \text{ где } \lambda = \frac{-\ln y_t}{t}\,. \qquad (8)$$

Многокритериальный способ прогнозирования надежности предусматривает рассмотрение этапов эксплуатационной надежности на уровне нормативных требований СП 35.13330.2011 в последовательности $U = 3$ $P_{\gamma i} = 0{,}9$ (рис. 2).

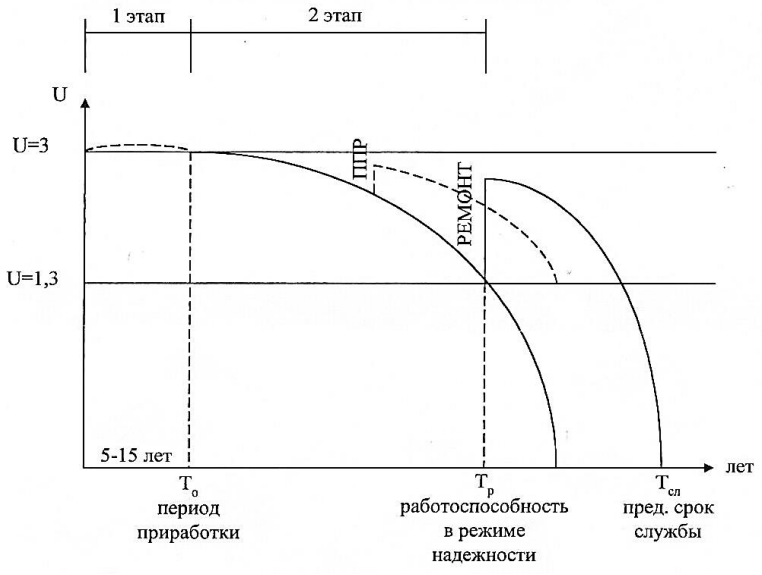


Рис. 2. Нормативные сроки службы мостов
Fig. 2. Standard service lives of bridges

Относительная надежность на любом этапе эксплуатации отображается в виде J – джей-интеграл кривой плотности распределения несущей способности (рис. 3).

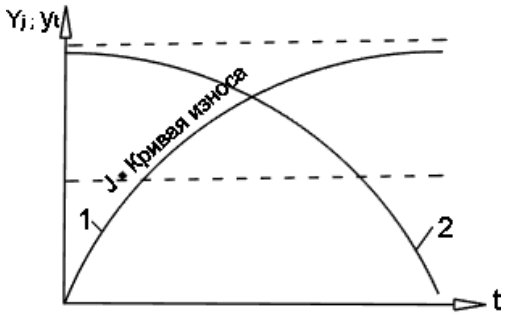


Рис. 3. Изменение надежности конструкции пролетных строений со временем:
$1 - J \to \frac{dy_t}{dt}$; $2 - \frac{dY_i}{dt}$ [12]

Fig. 3. Changes in the reliability of superstructures over time:
$1 - J \to \frac{dy_t}{dt}$; $2 - \frac{dY_i}{dt}$ [12]

При $y_t = 1 - \varepsilon$ и $\lambda = \frac{-\ln y_t}{t}$ проявление несовершенства за период времени эксплуатации t будет определяться равенством

$$\varepsilon = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \tag{9}$$

где ε, λ – общепринятые для мостостроения параметры – повреждение и износ [13].

Относительная надежность P_0 равна:

$$P_0 = 1 - \varepsilon. \tag{10}$$

Выводы

Многокритериальный подход в прогнозировании эксплуатационной надежности мостовых конструкций отображает не только количественный, но и качественный уровень эксплуатационной прочности. Использование элементов теории катастроф и синергетики в прогнозировании надежности расширяет диапазон вероятности предельных состояний:

– упругое и упругопластическое состояние с учетом запаздывания текучести;
– изменение прочности материала со временем;
– усталостные изменения в материале и конструкциях;
– изменение динамической надежности и нагруженности элементов;
– следственная зависимость множественности отказов с количеством несовершенств системы.

Список источников

1. *Картопольцев А.В.* Прогнозирование надежности бистальных балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 169–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-169-182
2. *Корчак М.Д., Галкин С.В., Картопольцев В.М.* Основы неустойчивости в теории катастроф инженерных конструкций. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1997. 123 с. ISBN 5-7511-0910-4 : Б. ц.

3. *Алексеев А.А., Картопольцев А.В., Черепанов Д.И.* К вопросу ресурсной долговечности пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-211-219
4. *Hult J.* Creep in Continua and Structures // Int. Conf. Greep and Fatigne in Elavated Temperatura Application Sheffreed. 1974. P. 137–155.
5. *Физдель И.А.* Дефекты в конструкциях и сооружениях и методы их устранения. Москва : Стройиздат, 1978. 160 с.
6. *Степин П.А.* О расчетных схемах балок // Исследования по теории сооружений. Москва ; Ленинград : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1951. С. 389–393.
7. *Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л.* Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов. Ленинград : ЛИСИ, 1989. 96 с.
8. *Потапкин А.А.* Методические указания к основам расчета мостовых конструкций на надежность. Москва : МАДИ, 1987. 20 с.
9. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. Москва : Машиностроение, 1975. 399 с.
10. *Семкин Е.Ф., Картопольцев В.М.* К вопросу многокритериальной оценки надежности мостов // Современные методы статического и динамического расчета сооружений и конструкций. Вып. 3. Воронеж, 1994. С. 25–33.
11. *Ditlevsen O., Madsen H.O.* Structural reliability methods. 2nd edition. Denmark : Department of Mechanical Engineering Technical University, 2007. 373 p.
12. *Мороз Л.С.* Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. 223 с.
13. *Нечаев Ю.П.* Долговечность искусственных сооружений // Эксплуатационная надежность искусственных сооружений. Москва : Транспорт, 1989. С. 67–72.

References

1. *Kartopol'tsev A.V.* Towards Durability of Redundant Composite Beams. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 169–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-169-182 (In Russian)
2. *Korchak M.D., Galkin S.V., Kartopol'tsev V.M.* Fundamentals of Instability in the Theory of Catastrophes of Engineering Structures. Tomsk: TSU, 1997, 123 p. (In Russian)
3. *Alekseev A.A., Kartopol'tsev A.V., Cherepanov D.N.* Towards Resource Durability of Bridge Spans. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (4): 211–219. (In Russian)
4. *Hult J.* Creep in Continua and Structures. In: *Proc. Conf. "Creep and Fatigue in Elevated Temperature Application"*. Sheffreed, 1974. Pp. 137–155.
5. *Fizel T.F.* Defects in Structures and Buildings and Methods for their Elimination. Moscow: Stroyizdat, 1978. 160 p. (In Russian)
6. *Stepin P.A.* Design Schemes of Beams. In: Research in the Theory of Structures. Moscow; Leningrad, 1951. Pp. 389–393. (In Russian)
7. *Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shaikevich V.L.* Reliability Prediction of Steel and Composite Concrete Bridges. Leningrad, 1989. 96 p. (In Russian)
8. *Potapkin A.A.* Methodology of Calculating Bridge Reliability. Moscow, 1987. 19 p. (In Russian)
9. *Malinin N.N.* Applied Theory of Plasticity and Creep. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 389 p. (In Russian)
10. *Semkin E.F., Kartopoltsev V.M.* On Multicriteria Assessment of Bridge Reliability. In: Modern Methods of Static and Dynamic Analysis of Structures. Vol. 3. Voronezh, 1994. Pp. 25–33. (In Russian)
11. *Ditllevsen O., Madsen N.O.* Structural Reliability Methods. 2nd ed. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2007. 373 p.
12. *Moroz L.S.* Mechanics and Physics of Deformation and Fracture of Materials. Leningrad: Mashinostroenie, 1984, 223 p. (In Russian)
13. *Nechaev Yu.P.* Durability of Artificial Structures. In: Service Reliability of Artificial Structures. Moscow: Transport, 1989. Pp. 67–72. (In Russian)

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Authors Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003.

Andrey V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, OOO “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@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 02.10.2024
Одобрена после рецензирования 23.10.2024
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 02.10.2024
Approved after review 23.10.2024
Accepted for publication 31.10.2024

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 203–216.

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 (1): 203–216.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 624.21/.8
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-203-216 EDN: WRUPVL

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА

Глеб Леонидович Огурцов, Николай Алексеевич Ермошин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Несмотря на принимаемые меры в области повышения качества проектирования, строительства и эксплуатации мостовых сооружений, количество случаев преждевременных отказов в работе конструктивных элементов мостов не сокращается. Во многом это обусловлено воздействием увеличивающейся интенсивности транспортных потоков и агрессивным влиянием на материалы конструкций химически активных атмосферных газов и противогололедных материалов. Однако нормативно-техническая база проектирования автомобильных дорог и мостов для обоснования безотказности и долговечности мостовых конструкций эти факторы не учитывает и предлагает использовать коэффициенты запаса прочности, основанные на ретроспективных статистических данных о дорожном движении и эксплуатации мостов. В результате сложилось противоречие между практикой обеспечения безопасности работы мостов и состоянием научно-методической базы решения этих вопросов. Для разрешения противоречия необходима разработка метода прогнозирования показателей безотказности пролетного строения моста, который учитывает совместную работу его конструктивных элементов, стохастический характер и динамику параметров транспортных потоков, а также деструктивное воздействие на мост агрессивных сред в течение расчетного срока службы.

Целью является разработка методологического подхода к оценке и прогнозированию показателей безотказности железобетонных пролетных строений мостов.

Методы. Предлагаемый метод определения показателей безотказности балочных пролетных строений железобетонных автодорожных мостов основан на применении математического аппарата структурных функций надежности сложных технических систем, определения показателей диффузии жидкостей и газов, имитационного моделирования работы балок пролетного строения.

Результаты. Полученные при реализации метода функции плотности распределения показателей безотказности пролетных строений с учетом стохастического характера состава и интенсивности движения, технологических процессов строительства, содержания мостовых сооружений и применяемых материалов, природно-климатических факторов позволяют прогнозировать сроки межремонтной службы мостов, разрабатывать организационно-технические и конструктивные решения по повышению безопасности мостовых сооружений.

***Ключевые слова*:** транспортное строительство, безотказность, средний срок службы, механизмы разрушения, пролётное строение, мостовое сооружение, агрессивные среды

© Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А., 2025

Для цитирования: Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А. Метод определения безотказности пролетного строения моста на основе структурно-функционального подхода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 203–216. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-203-216. EDN: WRUPVL

ORIGINAL ARTICLE

RELIABILITY DETERMINATION OF BRIDGE SPAN BASED ON STRUCTURAL AND FUNCTIONAL APPROACHES

Gleb L. Ogurtsov, Nikolai A. Ermoshin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. Despite measures taken to improve the quality of design, construction and operation of bridge structures, failures in the structural elements of bridges do not decrease. This is largely due to the intensified traffic flow and aggressive effect of chemically-active atmospheric gases and deicing materials on structural materials. However, regulatory documents on the road and bridge design do not take these factors into account to justify their reliability and durability and suggest to use safety margin coefficients based on retrospective statistical data on traffic and bridge operation. The result is a contradiction between ensuring the bridge safety and scientific and methodological base for solving these issues. It is thus necessary to develop a method for predicting the bridge reliability, which takes into account the joint operation of its structural elements, stochastic nature, dynamic parameters of traffic flow, and a destructive effect of aggressive environment on the bridge during its service life.

Purpose: The development of a methodological approach to the assessment and prediction of reliability indicators of reinforced concrete bridge spans.

Methodology: The proposed method to determine reliability indicators of bridge spans is based on the mathematical apparatus for structural reliability functions of complex systems, determining the diffusion of liquids and gases and simulating the span operation.

Research findings: The distribution density functions of superstructures obtained during the method implementation, taking into account the stochastic nature of the composition and intensity of traffic, technological processes of construction, maintenance of bridge structures and materials used, natural and climatic factors, allow to predict the duration of the inter-repair service of bridges, develop organizational, technical and constructive solutions to improve the bridge safety.

Keywords: transport construction, reliability, average service life, destruction mechanisms, superstructure, bridge structure, aggressive environments

For citation: Ogurtsov G.L., Ermoshin N.A. Reliability Determination of Bridge Span Based on Structural and Functional Approaches. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 203–216. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-203-216. EDN: WRUPVL

Введение

Безопасность работы мостовых сооружений обеспечивается достижением требуемых значений показателей безотказности и долговечности их конструктивных элементов, и в частности пролетных строений. Эти показатели обосновываются в проектных конструктивно-технических решениях, обеспечиваются и поддерживаются на необходимом уровне в ходе строительства, содержания и ремонта мостовых сооружений на уровне нормативных значений.

В соответствии с требованиями нормативно-технических документов (СП 35.13330.2011. Мосты и трубы) безотказность пролетного строения достигается путем соблюдения указанных технических, технологических и конструктивных требований на основе детерминистического подхода обеспечения прочности. Основные расчеты по обеспечению прочности выполняются для каждого конструктивного элемента отдельно без учета структурно-функциональной схемы надежности всего пролетного строения и влияния отказов его конструктивных элементов.

Преждевременные отказы конструктивных элементов происходят вследствие как причинно-определенных, так и случайных факторов, обусловленных вероятностным характером физико-механических характеристик конструкционных материалов, состава и интенсивности транспортного потока, природно-климатических условий, а также ошибками проектирования, нарушениями стабильности и точности технологических процессов, ненадлежащим содержанием мостовых сооружений.

Однако нормирование показателей надежности мостовых сооружений не в полной мере учитывает стохастическую природу прочности конструктивных элементов и осуществляется назначением коэффициента запаса прочности. Этот коэффициент обосновывается данными ретроспективного статистического анализа и не учитывает множество сочетаний как благоприятных, так и деструктивных факторов безотказной работы пролетных строений. В целях повышения безопасности функционирования мостовых сооружений необходимы достоверные методы прогнозирования и оценки безотказности пролетных строений мостов, позволяющие определить наиболее вероятное время работы до отказа для всего пролетного строения с учетом воздействующих факторов износа и его структурно-функциональной схемы.

Методы и материалы

Мостовое сооружение можно представить в виде совокупности конструктивных подсистем, представляющей в укрупненном виде систему последовательно-соединенных элементов «основание – фундамент – промежуточная/береговая опора – пролетное строение» (рис. 1).

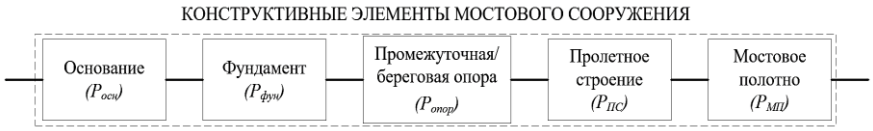


Рис. 1. Структурная схема надежности мостового сооружения
Fig. 1. Schematic of bridge structure reliability

Отказ одного конструктивного элемента мостового сооружения приводит к его полному отказу. Вероятность безотказной работы $P_{\text{мс}(t)}$ в момент времени t мостового сооружения определяется по формуле

$$P_{\text{мс}(t)} = P_{\text{осн}(t)} \cdot P_{\text{фун}(t)} \cdot P_{\text{опор}(t)} \cdot P_{\text{пс}(t)} \cdot P_{\text{мп}(t)}, \quad (1)$$

где $P_{осн(t)}$, $P_{фун(t)}$, $P_{опор(t)}$, $P_{пс(t)}$, $P_{мп(t)}$ – соответственно вероятность безотказной работы грунтового основания, фундамента, промежуточной/береговой опоры, пролетного строения и мостового полотна.

Каждый укрупненный конструктивный элемент, представленный на рис. 1, возможно декомпозировать на более «мелкие» элементы с учетом их конструктивных особенностей и взаимного влияния.

Отказом пролетного строения является состояние, при котором не обеспечиваются транспортно-эксплуатационные показатели мостового сооружения на участке автомобильной дороги – невозможен или ограничен безопасный пропуск транспортных средств заданной интенсивности, скорости и нагрузки на ось [1, 2]. Полный отказ пролетного строения может наступить вследствие зависимых и внезапных отказов его конструктивных элементов. Внезапные отказы могут быть следствием несоблюдения подмостового габарита, в результате чего возникают локальные повреждения, такие как срез рабочей арматуры и разрушение бетона.

Как отмечалось выше, безотказность пролетного строения зависит от прочности конструктивных элементов и определяется его структурно-функциональной схемой надежности. В связи с этим необходимо определить количественные характеристики механизмов разрушения конструктивных элементов, при которых наступает их отказ по прочности, а также установить их взаимное влияние на безотказность пролетного строения.

Пролетное строение железобетонного моста представляет собой систему балок, соединенных двухузловыми упругими связями – монолитной плитой. Образование связей происходит за счет омоноличивания верхней ненапрягаемой арматуры балок. Следовательно, следует рассматривать плитно-ребристое пролетное строение как две подсистемы [3, 4]: плита, полученная при омоноличивании балок, и балки, включающие напрягаемую арматуру (рис. 2).

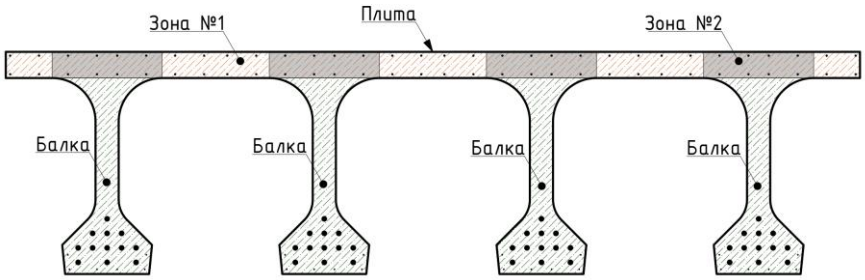


Рис. 2. Конструктивная схема пролетного строения
Fig. 2. Construction arrangement of bridge span

Конструктивную схему плиты следует декомпозировать на две зоны:

– зону № 1, при отказе участка которой происходит разделение системы пролетного строения без исключения из работы балки пролетного строения;

– зону № 2, при отказе участка которой происходит разделение системы пролетного строения с исключением из работы балки пролетного строения, над которой произошел отказ.

Разрушение участка любой длины зоны № 1 приводит к разделению взаимной работы системы балок пролетного строения без значительного изменения напряженно-деформированного состояния пролетного строения [5]. При этом разрушение плиты приводит к образованию дефектов мостового полотна, в результате которых ограничивается пропускная способность участка автомобильной дороги. Разрушение плиты в зоне № 2 возможно принять эквивалентным отказу балки пролетного строения. Следовательно, отказ элементов плиты не влияет на работу пролетного строения и расчет его безотказности следует производить по главным балкам.

Безотказность работы балки можно считать обеспеченной, если расчетная вероятность разрушения по определенным механизмам достижения предельного состояния не превосходит нормативно установленного значения согласно ГОСТ Р 58137–2018 «Дороги автомобильные общего пользования. Руководство по оценке риска в течение жизненного цикла». Нормативная вероятность разрушения принимается на основании вероятности причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда [6, 7].

При детерминистическом подходе основные механизмы разрушения балок в начальный момент времени при $t = 0$ срабатывают, когда одновременно выполняются следующие условия:

$$\tilde{M}_{y,ti} \geq \tilde{M}_{ult,ti}; \quad (2)$$

$$\tilde{f}_{z,ti} \geq f_{ult,i}; \quad (3)$$

$$\tilde{a}_{crc,ti} \geq a_{crc,ult,i}, \quad (4)$$

где $\tilde{M}_{y,ti}$ – случайная величина изгибающего момента *i*-го конструктивного элемента (ПС) в момент времени t, вызванного внешними нагрузками, кНм; $\tilde{M}_{ult,ti}$ – случайная величина предельного изгибающего момента *i*-го конструктивного элемента в момент времени t, кНм; $\tilde{f}_{z,ti}$ – случайная величина вертикальных перемещений *i*-го конструктивного элемента, представляющая собой функцию зависимости от изгибающего момента $\tilde{M}_{y,ti}$ и момента образования трещин $\tilde{M}_{crc,ti}$, в момент времени t, мм; $f_{ult,i}$ – нормативная величина предельных вертикальных перемещений *i*-го конструктивного элемента, мм; $\tilde{a}_{crc,ti}$ – случайная величина ширины раскрытия трещин, мм, определяемая по условию

$$\tilde{a}_{crc,ti} = \begin{cases} 0 \text{ при } \tilde{M}_{y,ti} < \tilde{M}_{crc,ti}; \\ \tilde{a}_{\left(\tilde{f}_{z,ti}\right),ti} \text{ при } \tilde{M}_{y,ti} \geq \tilde{M}_{crc,ti}; \end{cases} \quad (5)$$

$a_{crc,ult,i}$ – нормативная величина ширины раскрытия трещины *i*-го конструктивного элемента, мм, $a_{crc,ult} = 0{,}15$ (СП 35.13330.2011. Мосты и трубы).

В процессе эксплуатации работоспособным состоянием конструктивного элемента является состояние, при котором условия (2) – (4) не выполняются.

В случае, когда одно или два условия (3) и (4) выполняются, конструктивный элемент переходит в ограниченно-работоспособное состояние, называемое частичным отказом. Если условие (2) выполняется, то конструктивный элемент переходит в неработоспособное состояние, т. е. наступает его полный отказ.

Оценку безотказности пролетного строения принято выполнять для воздействия от нормативной подвижной нагрузки типа АК, которая располагается в центре пролета (рис. 3) по четырем полосам движения согласно СП 35.13330.2011.

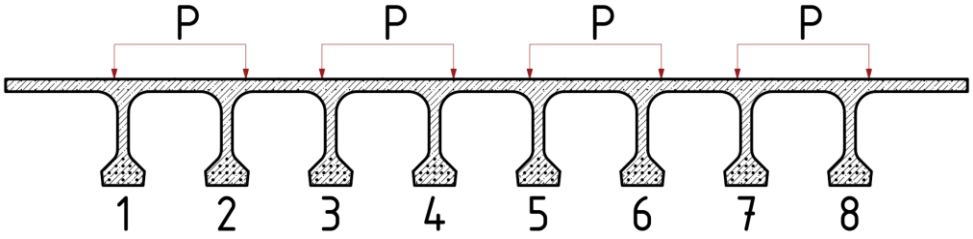


Рис. 3. Расположение подвижной нагрузки АК на пролетном строении
Fig. 3. Location of live load on span structure

Для определения структурно-функциональной схемы надежности пролетного строения принят метод прямого перебора, который заключается в последовательном исключении из работы балок пролетного строения и плит омоноличивания. Выходные параметры каждого состояния заносятся в таблицу, и на их основании выполняется определение влияния отказа *i*-х конструктивных элементов на работоспособное состояние. Всё множество состояний пролетного строения разделяется на два подмножества: подмножество состояний работоспособности системы *A* и подмножество состояний отказа системы *B*. За критерий отказа балки пролетного строения принято превышение значения предельного изгибающего момента $\tilde{M}_{ult}$ результирующим моментом (усилием) M_y, создаваемым в балке от действия расчетной подвижной нагрузки по условию (2). На основании результатов проведенных моделирований [8] принято допущение, что предельный изгибающий момент является случайной величиной, подчиняющейся закону бета-распределения с минимальным значением 7479,69 кНм и максимальным значением 9121,81 кНм (рис. 4). Плотность бета-распределения описывается формулой

$$f_{M_{ult}} = \frac{1}{B(\alpha,\ \beta)} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}, \qquad (6)$$

где α и β – параметры формы, α = 5,47 и β = 3,21 для *i*-й балки пролетного строения.

Оценка влияния внезапного отказа балки на работоспособность пролетного строения производилась с применением численного моделирования в программном комплексе Midas CIVIL, позволяющем определить параметры напряженно-деформированного состояния пролетного строения методом конечных элементов.

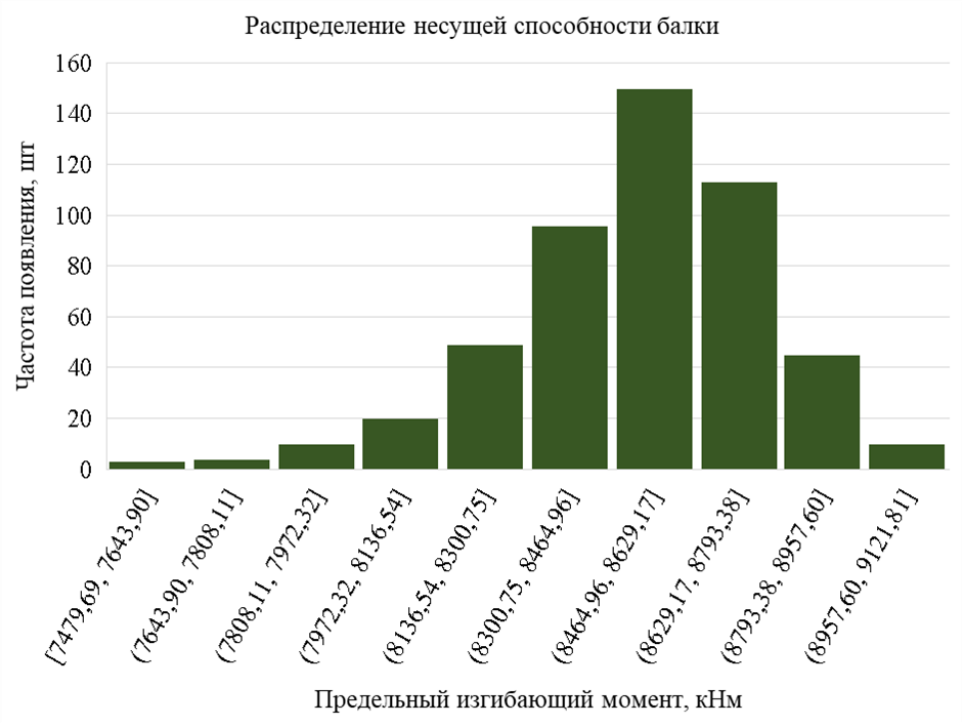


Рис. 4. Плотность распределения несущей способности балки пролетного строения
Fig. 4. Probability density function of the load-bearing capacity of the bridge span

Вероятности безотказной работы балок вычислялись как отношение числа испытаний, при которых значение предельного изгибающего момента балок больше, чем создаваемый изгибающий момент, к общему количеству испытаний (таблица).

Возможные события

Expected events

Индекс состояния	№ балки пролетного строения	Изгибающий момент, кНм	Вероятность безотказной работы балки	Подмножество состояний
1 (8)	1	–	–	*A*
	2	8195,20	0,89	
	3	5669,33	0,99	
	4	5119,02	0,99	
	5	4896,41	0,99	
	6	4894,29	0,99	
	7	5053,66	0,99	
	8	5286,38	0,99	

Окончание таблицы
End of table

Индекс состояния	№ балки пролетного строения	Изгибающий момент, кНм	Вероятность безотказной работы балки	Подмножество состояний
2 (7)	1	7307,87	0,99	*A*
	2	–	–	
	3	6632,22	0,99	
	4	5165,67	0,99	
	5	4892,71	0,99	
	6	4883,81	0,99	
	7	5033,83	0,99	
	8	5272,57	0,99	
…				
12 (78)	1	–	–	*B*
	2	–	–	
	3	10057,36	0,00	
	4	6417,16	0,99	
	5	5602,18	0,99	
	6	5340,39	0,99	
	7	5342,13	0,99	
	8	5454,50	0,99	
…				
456	1	6223,25	0,99	*B*
	2	6680,76	0,99	
	3	9314,10	0,00	
	4	–	–	
	5	–	–	
	6	–	–	
	7	9558,60	0,00	
	8	6922,71	0,99	

Примечание. «–» обозначены балки, которые исключены из работы системы.

Результаты прямого перебора демонстрируют, что система пролетного строения имеет сложную структуру с последовательно-параллельными элементами, в которой отказ трех последовательных балок или отказ двух из трех крайних балок приводит к зависимым отказам (рис. 5), т. е. начинается процесс лавинообразного обрушения.

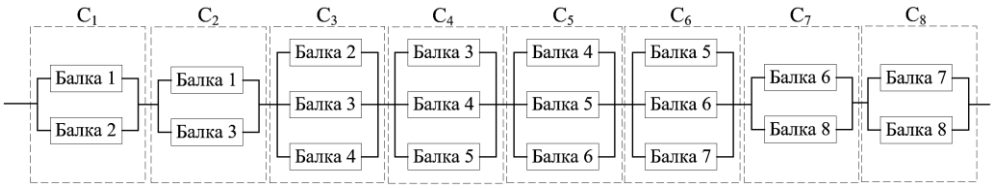


Рис. 5. Структурная схема надежности пролетного строения
Fig. 5. Schematic of span structure reliability

Построение структурной схемы надежности балочного пролетного строения на основе результатов численного моделирования позволяет определить вероятность его безотказной работы.

Ввиду неравномерности нагружения транспортным потоком вероятности отказов блоков будут неодинаковы. Следовательно, вероятность безотказной работы каждого последовательно-соединенного блока *C* описывается формулой

$$P_C = 1 - \prod_{i \in C} (1 - p_i), \tag{7}$$

где p_i – вероятность безотказной работы *i*-й балки пролетного строения, принадлежащей к блоку $C = 1, 2 \ldots b$.

Вероятность безотказной работы всей системы пролетного строения (как последовательной структуры) определяется по формуле

$$P_{(t)} = \prod_{C=1}^{b} P_C = \prod_{C=1}^{b} \left(1 - \prod_{i \in C} (1 - p_i) \right). \tag{8}$$

Обеспечение прочности пролетного строения зависит от каждого конструктивного элемента в любой момент времени t. Балка пролетного строения относится к стареющей системе [11, 12, 13], вероятность безотказной работы которой ($p_{i(t)}$) описывается экспоненциальным законом распределения:

$$p_{i(t)} = e^{-\lambda_i t}, \tag{9}$$

где t – время наработки пролетного строения или его балки, лет; λ_i – интенсивность отказа *i*-й балки пролетного строения, которую возможно определить через математическое ожидание M_i времени наработки на отказ по формуле

$$\lambda_i = \frac{1}{M_i}. \tag{10}$$

На основании результатов обследований мостовых сооружений [9, 10, 14] выявлено, что существует период времени (t_n), в ходе которого происходит инициирование процессов деградации, таких как коррозия арматуры, накопление усталостных макротрещин в арматуре и бетонном камне. Продолжительность данного периода времени зависит от принятых конструктивно-технологических решений [15]. С учетом этого отказ *i*-й балки будет зависеть от данного периода и определяться по формуле

$$p_{i(t)} = \begin{cases} 1 \text{ при } t < t_n; \\ e^{-\lambda_i (t - t_n)} \text{ при } t \geq t_n. \end{cases} \quad (11)$$

СП 35.13330.2011 установлено требование, что математическое ожидание времени работы на отказ пролетного строения составляет 100 лет. Фактически период инициирования процессов деградации и математическое ожидание времени работы на отказ являются многомерными случайными величинами, которые зависят от совокупности воздействующих внешних факторов. Ввиду многомерности и сложности аналитического описания функции распределения времени безотказной работы балки и показателей его рассеивания, целесообразно установить ее вид методами имитационного моделирования или методом подобия.

На основании выявленной закономерности можно определить все статические характеристики безотказности. Тогда среднее время работы до отказа вычисляется по общей формуле

$$T = \int_0^\infty P_{(t)} dt. \quad (12)$$

Вероятность обеспечения гамма-процентного срока службы t_γ определяется по формуле

$$P_{(t_\gamma)} = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (13)$$

где γ – заданный уровень, вероятность, при котором не наступает отказ, %.

Результаты

Реализация метода выполнена для пролетного строения, структурная схема которого представлена на рис. 5. По объекту-аналогу определено, что время наработки на отказ для балок 1–2 (7–8) составляет 75 лет, а для балок 3–6 – 100 лет. Время от момента ввода в эксплуатацию до начала значимых деградационных процессов составляет 5 лет. Необходимо определить остаточный срок службы и вероятность безотказной работы на 50-й год эксплуатации.

Для каждого конструктивного элемента (балки) определяется интенсивность отказа по формуле (11), где вместо математического ожидания применяются значения времени наработки на отказ. Далее, по формуле (10) вычисляется вероятность безотказной работы каждого *i*-го элемента на срок эксплуатации 50 лет:

$$p_1 = p_2 = p_7 = p_8 = e^{-\frac{1}{75}(50-10)} = 0{,}587;$$

$$p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = e^{-\frac{1}{100}(50-10)} = 0{,}670.$$

Вычисление вероятности безотказной работы каждого блока осуществляется по формуле (8):

$$P_1 = P_8 = 0{,}829;$$

$$P_2 = P_7 = 0{,}864;$$

$$P_3 = P_6 = 0,955;$$
$$P_4 = P_5 = 0,964.$$

Отсюда вероятность безотказной работы всего пролетного строения вычисляется по формуле (9):

$$P = \prod_{C=1}^{b=8} P_B = 0,435.$$

Вероятность безотказной работы на 50-й год эксплуатации составила 0,435. На основании расчетов построен график зависимости вероятности безотказной работы пролетного строения и его элементов от времени эксплуатации моста (рис. 6).

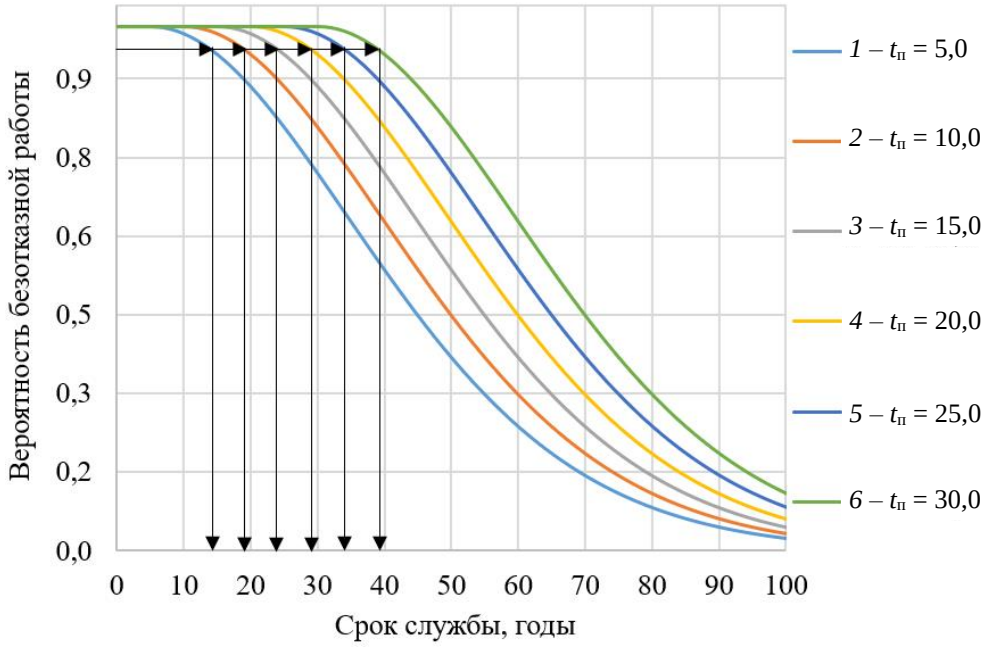


Рис. 6. Вероятность безотказной работы пролетного строения в течение срока службы при различных периодах времени инициирования процессов деградации $t_п$

Fig. 6. Probability of failure-free operation of span structure during its service life at different time periods of degradation process initiation

Выявленные в ходе имитационного моделирования зависимости и их графическая интерпретация позволяют определять сроки выполнения ремонтных работ в соответствии с принятыми конструктивно-технологическими решениями на стадии проектирования и строительства в заданных условиях эксплуатации. Так, по характеру кривой *1* можно установить необходимость выполнения ремонтно-восстановительных работ на 14-м году. Дальнейшее снижение вероятности безотказности приведет к утрате работоспособности. Среднее время работы до отказа, вычисленное по зависимости (12), составляет 44 года 300 дней. Однако среднее время работы до отказа для балок пролетного строения соста-

вило 70 лет 185 дней и 83 года 283 дня соответственно. В зависимости от механизмов деградации возможно предпринять меры по увеличению среднего срока службы. Таковыми могут быть: увеличение защитного слоя бетона, уменьшение водоцементного отношения, повышение поперечного сечения рабочей арматуры, окраска открытых поверхностей бетона, отказ от применения солей-антиобледенителей при зимнем содержании, контроль весовых и габаритных характеристик транспортных средств, снижение плотности потока. Научное обоснование функций плотности распределений времени безотказной работы для этих мероприятий является направлением дальнейших исследований.

Предложенный метод определения безотказности позволяет оценить качество конструктивно-технологических решений на стадии проектирования мостовых сооружений, вероятность безотказной работы и среднее время работы пролетного строения до отказа с учетом состава и интенсивности транспортного потока, природно-климатических условий и технологий эксплуатации мостов, воздействующих агрессивных факторов, а также продолжительность межремонтных периодов и сроки проведения ремонтно-восстановительных работ.

Список источников

1. *Савчинский Б.В.* Критерии оценки надежности железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2007. № 19. С. 229–231.
2. *Сафронов В.С., Антипов А.В., Черников А.В.* Надежность и долговечность сборно-монолитного плитного пролётного строения автодорожного моста // Строительная механика и конструкции. 2019. Т. 2. № 21. С. 76–88. EDN: RNJLAX
3. *Сафронов В.С., Мельхиор Н.* Показатели надежности железобетонных пролетных строений проектируемых автодорожных мостов для современных российских и европейских нормативных временных нагрузок // Строительная механика и конструкции. 2020. Т. 2. № 25. С. 44–57. EDN: ZGFFJM
4. *Козак Н.В., Сырков А.В., Быстров В.А., Ярошутин Д.А.* Анализ влияния отказов элементов объединения на эксплуатационную надежность сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Транспортные сооружения. 2023. Т. 10. № 3. URL: https://t-s.today/PDF/07SATS323.pdf. DOI: 10.15862/07SATS323
5. *Краснощеков Ю.В.* О безопасности железобетонных мостов с плитными пролетными строениями // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15. № 6 (64). С. 922–932. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-922-932
6. *International Organization of Standardization* ISO 2394:2015 – General principles of reliability for structures, 2015.
7. *Тур В.В., Тур А.В., Дереченник С.С.* О назначении требуемых мер надежности при разработке национальных нормативных документов по проектированию строительных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 2–15. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-2-15
8. *Хан Д.Д., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах / пер. с англ. Е.Г. Коваленко ; под ред. В.В. Налимова. Москва : Мир, 1969. 395 с.
9. *Шестовицкий Д.А.* Обоснование надежности и сроков службы проектируемых мостов // Дороги и мосты. 2021. № 2. С. 203–227.
10. *Белый А.А., Мячин В.Н., Вуколов С.А.* Методика оценки и прогнозирования надежности постоянных мостовых переходов на автомобильных дорогах оборонного значения // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения. 2021. № 2. С. 105–111.
11. *Кандаева И.В., Бородай Д.И.* Исследование надежности железобетонных пролетных строений автодорожного путепровода // Современное промышленное и гражданское строительство. 2017. Т. 13. № 2. С. 47–56. EDN: YZLGJJ

12. *Белый А.А., Андрушко С.Б.* Пути повышения надежности эксплуатации железобетонных мостов для пропуска сверхнормативной нагрузки // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15. № 1. С. 17–29.
13. *Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А.* К вопросу прогнозирования динамической надежности пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 6. С. 170–181. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181
14. *Medina P.A., González F.J.L., Todisco L.* Data-driven prediction of long-term deterioration of RC bridges // Construction and Building Materials. 2022. V. 317. P. 125790.
15. *Белый А.А.* Вероятностное прогнозирование технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2. С. 64–74. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-2-64-74

References

1. *Savchinsky B.V.* Assessment Criteria of Reliability of Reinforced Concrete Span Structures of Road Bridges. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta*. 2007; (19): 229–231. (In Russian)
2. *Safronov V.S., Antipov A.V., Chernikov A.V.* Reliability and Durability of Prefabricated-Monolithic Slab Span Structures of Road Bridges. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktsii*. 2019; 2(21): 76–88. (In Russian)
3. *Safronov V.S., Melkhior N.* Reliability Indicators of Reinforced Concrete Span Structures of Bridges Designed for Live Load Standard in Russia and Europe. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktsii*. 2020; 2 (25): 44–57. EDN: ZGFFJM (In Russian)
4. *Kozak N.V., Syrkov A.V., Bystrov V.A., Yaroshutin D.A.* Analysis of Element Failure on Reliability of Composite Steel Bridge Spans. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023;10 (3). Available: https://t-s.today/PDF/07SATS323.pdf. DOI: 10.15862/07SATS323 (In Russian)
5. *Krasnoshchekov Yu.V.* Safety of Reinforced Concrete Bridges with Slab Spans. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*. 2018; 15 (6 (64)): 922–932. (In Russian)
6. International Organization of Standardization ISO 2394:2015 – General principles of reliability for structures, 2015.
7. *Tur V.V., Tur A.V., Derechennik S.S.* On Required Reliability Measures on Development of National Regulatory Documents for Structural Design. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*.2020; (1): 2–15. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-2-15 (In Russian)
8. *Hahn G., Shapiro S.* Statistical Models in Engineering. Moscow: Mir, 1969. 395 p. (Russian translation)
9. *Shestovitsky D.A.* Reliability Justification and Service Life of Bridges. *Dorogi i mosty*. 2021; (2): 203–227. (In Russian)
10. *Bely A.A., Myachin V.N., Vukolov S.A.* Assessment Methodology and Reliability Prediction of Permanent Bridge Crossings on Roads of Strategic Importance. *Vestnik Voennoi akademii material'no-tekhnicheskogo obespecheniya*. 2021; (2): 105–111. (In Russian)
11. *Kandaeva I.V., Boroday D.I.* Reliability of Reinforced Concrete Span Structures of Highway Overpasses. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017; 13 (2): 47–56. EDN: YZLGJJ (In Russian)
12. *Bely A.A., Andrushko S.B.* Operational Reliability Improvement of Reinforced Concrete Bridges for Handling Over-Normative Loads. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*. 2018; 15 (1): 17–29. (In Russian)
13. *Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V., Alekseev A.A.* Towards Predicting Dynamic Reliability of Bridge Spans. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (6): 170–181. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181 (In Russian)
14. *Medina P.A., González F.J.L., Todisco L.* Data-Driven Prediction of Long-Term Deterioration of RC Bridges. *Construction and Building Materials*. 2022; 317: 125790.
15. *Bely A.A.* Probabilistic Forecasting of Technical Condition of Reinforced Concrete Bridges in Urban Areas. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017; (2): 64–74. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-2-64-74 (In Russian)

Сведения об авторах

Огурцов Глеб Леонидович, ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б, ogurtsov_gl@spbstu.ru

Ермошин Николай Алексеевич, докт. военных наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б, ermoshin_na@spbstu.ru

Authors Details

Gleb L. Ogurtsov, Assistant Lecturer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya Str., 195251, Saint-Petersburg, Russia, ogurtsov_gl@spbstu.ru

Nikolai A. Ermoshin, DSc, Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya Str., 195251, Saint-Petersburg, Russia, ermoshin_na@spbstu.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 06.12.2024
Одобрена после рецензирования 12.01.2025
Принята к публикации 13.01.2025

Submitted for publication 06.12.2024
Approved after review 12.01.2025
Accepted for publication 13.01.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 217–232.

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 (1): 217–232.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 624.21.014.072
DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-217-232 EDN: ZRTVFQ

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ НА УПРУГО-ПОДАТЛИВОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Наталья Анатольевна Чернышова, Александр Аверьянович Алексеев, Алексей Андреевич Банников
Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Совершенствование расчета конструктивного элемента нежесткой дорожной одежды покрытия на упруго-податливом полупространстве с учетом инерционности поведения является актуальной задачей в теории упругости и упруго-вязко-пластического деформирования.

Цель. Уточняется расчет плиты из асфальтобетона (как конструктивного элемента проезжей части) от давления колеса автомобиля с определением перемещений, податливости полупространства и с частичным отрывом плиты от основания и «паразитных» колебаний методами упругости строительной механики.

Практическая значимость. Представлен математический аппарат расчета при контакте временной автомобильной нагрузки с асфальтобетонной плитой проезжей части в зависимости от граничных условий закрепления плиты на упруго-податливом полупространстве.

Ключевые слова: асфальтобетон, проезжая часть, колебания, упругие связи, временная нагрузка, деформации, прочность

Для цитирования: Чернышова Н.А., Алексеев А.А., Банников А.А. К вопросу расчета асфальтобетонной плиты на упруго-податливом полупространстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 217–232. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-217-232. EDN: ZRTVFQ

ORIGINAL ARTICLE

STRENGTH ANALYSIS OF PREFABRICATED BITUMINOUS SLAB ON ELASTIC HALF-SPACE

Natalya A. Chernyshova, Aleksandr A. Alekseev, Aleksei A. Bannikov
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The paper studies a prefabricated bituminous slab on elastic half-space having inertia when operating at live loads.

Purpose: The building mechanics problem is solved for the prefabricated bituminous slab as a structural element of roadway with the detection of displacements of elastic half-space, partial slab detachment from the base and parasitic oscillations.

© Чернышова Н.А., Алексеев А.А., Банников А.А., 2025

Research findings: An attempt is made to provide the accurate strength analysis of the prefabricated bituminous slab.

Practical implications: A mathematical calculation apparatus is presented for the contact of a temporary automobile load with the bituminous slab, depending on the boundary conditions of elastic half-space.

Keywords: bitumen, carriageway, vibrations, elastic bonds, live load, deformation, strength

For citation: Chernyshova N.A., Alekseev A.A., Bannikov A.A. Strength Analysis of Prefabricated Bituminous Slab on Elastic Half-Space. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 217–232. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-217-232. EDN: ZRTVFQ

Расчет асфальтобетонных плит на упругом и упруго-податливом полупространстве является одной из сложных задач строительной механики [1]. К общим трудностям, присущим расчету плит различной толщины, состоящих из двух и более слоев асфальтобетона, добавляются вопросы, связанные с установлением перемещений поверхности упруго-податливого полупространства, на которое опирается асфальтобетонное покрытие с учетом роли упругих связей. Передаваемые от воздействия колеса автомобиля на плиту полупространства нагрузки, особенно динамические и инерционные, влияют на отрыв плиты от основания с одновременным проявлением «паразитных» колебаний [2]. В настоящее время наиболее приемлемые решения в задачах расчета различных плит конечной и бесконечной длины на упруго-податливом полупространстве отражены в известных работах О.Я. Шехтера, А.В. Винокуровой, Б.З. Коренева, Г.С. Шапиро, М.М. Филоненко-Бородич и др.

Поскольку конструктивный элемент нежесткой дорожной одежды в виде асфальтобетонной плиты характеризуется сравнительно невысокой сопротивляемостью изгибу и анизотропией свойств упруго-податливого основания, необходимо совершенствовать методы теоретико-эмпирической расчета, которые должны обладать не только универсальностью, но и введением в расчет теории упругости, строительной механики и механики твердого деформированного тела с учетом проявления в работе плиты проезжей части дополнительных упруго-вязко-пластичных свойств и ползучести во времени, учитывающих деструктивные свойства при статическом и динамическом воздействии нагрузки. В качестве конструктивных решений предлагается рассматривать два варианта [3]:

– один слой асфальтобетона на поверхности упруго-податливого однородного полупространства;

– два слоя асфальтобетона конечной толщины на поверхности упруго-податливого полупространства.

По аналогии с зарубежными исследованиями принимаем за основной вид покрытия двухслойную асфальтобетонную плиту, рассматривая её как саморазгружающуюся слоистую конструкцию во времени за счет наиболее ответственного слоя, непосредственно контактирующего с упруго-податливым полупространством. Тогда условием постоянства во времени эксплуатационных качеств и параметров конструкции при стационарных силовых, температурных и реологических условиях должна обеспечиваться прочность и деформативность в слоях и соответствовать неравенству

$$\Delta\alpha(t)\frac{d}{d\sigma_{0(t)}}\left(\frac{E_{\text{н}}(t)}{E_{\text{в}}(t)}\right)<\frac{d\sigma_0(t)}{d(t)}, \qquad (1)$$

где $\Delta\alpha$ – разница удельной деформации слоев; t – время эксплуатации; $E_{\text{н}}$ – модуль деформации нижнего слоя; $E_{\text{в}}$ – модуль деформации верхнего слоя; σ_0 – напряжение, равное длительному сопротивлению.

Таким образом, расчет асфальтобетонной плиты проезжей части нежестких дорожных одежд рассматривается как задача Буссинеска с граничными условиями расчета схем Н.И. Безухова – А.П. Синицына (рис. 1).

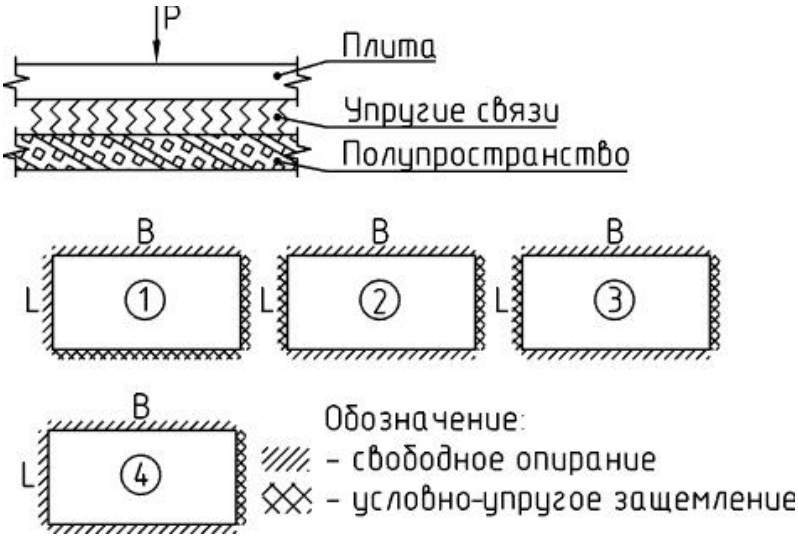


Рис. 1. Расчетная схема и граничные условия асфальтобетонной плиты:
1, 2, 3 – полубесконечной длины; *4* – бесконечной длины
Fig. 1. Calculation scheme and boundary conditions of bituminous slab:
1, 2, 3 – semi-infinite length; 4 – infinite length

Используя элементы эндохронной (упруговязкой) теории упругости и инкрементальной теории пластичности, определяем коэффициент условного упругого защемления λ [4]:

$$\lambda=\text{к}_c\frac{R}{EJn}, \qquad (2)$$

где EJn – жесткость анизотропной плиты с условно-упругим защемлением, равна $\frac{E\,h_{\text{пл}}^3}{12(1-\mu)}$; к_c – коэффициент постели; μ – коэффициент Пуассона; R – равнодействующая сил упругого распределения, действующая на плоскость, ограничивающая полубесконечное или бесконечное тело, равна $\sqrt{x^2+z^2}$.

На основании бигармонического условия Буссинеска при $R=\sqrt{x^2+z^2}$ и $\frac{dR}{dz}=\frac{z}{R}$ деформации и напряжения в плите будут определяться [5]:

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma x - \mu\sigma z\right]; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G};\\
&\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma z - \mu\sigma z\right]; \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G};\\
&\sigma_x = \frac{P}{2\pi R^2}\left[\frac{(1-2\mu)R}{R+z} - \frac{3x^3}{R^3}\right];\\
&\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2}\frac{z^3}{R^3};\\
&\tau_{xz} = -\frac{3P}{2\pi R^2}\frac{xz^2}{R^3}.
\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Перемещения и деформации условных упругих связей между плитой и упруго-податливым полупространством определяются равенством

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_{\text{связей}} = -\frac{P(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi\cdot E\cdot x};\\
&Y_{\text{связей}} = \frac{P(1-\mu^2)}{\pi\cdot E\cdot x}.
\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

При x = 0,5 м

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_{\text{связей}} = -\frac{P(1+\mu)(1-2\mu)}{\pi E};\\
&Y_{\text{связей}} = -\frac{P(1-\mu^2)}{0{,}5\pi\cdot E}.
\end{aligned}\right\}$$

Расчет асфальтобетонных плит нежесткого типа дорожной одежды, лежащей на упругом основании в виде железобетонных монолитных или сборных плит, достаточно проработан и известен. Более того, совершенствование расчета будет заключаться в рассмотрении несущего слоя асфальтобетонной плиты как упруговязкого полупространства, расположенного на упруго-податливом полупространстве. Под полупространством понимается тело, ограниченное с одной стороны плоскостью (рис. 1), основной характеристикой которого является перемещение ε_n. Существует и другое определение полупространства – это тело, ограниченное плоскостью-полуплоскостью.

Все контактные задачи на полупространстве, ограниченные полуплоскостью, относятся к задачам Буссинеска – Фламана [5], а задача на полупространстве, ограниченная плоскостью-полуплоскостью, – к задачам Буссинеска [6]. Для таких вариантов расчета предельное состояние по прочности и деформативности связано с нарушением сплошности верхнего слоя плиты покрытия и рассматривается во времени с наступлением «местного» предельного состояния упруго-податливого полупространства с характеристиками [7]:

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_n = -\frac{P(1-\mu)x}{2\pi E R^2}\left[\frac{(1-2\mu)R}{R+z} - \frac{z}{R}\right];\\
&Y_n = \frac{P(1+\mu)}{2\pi\cdot E\cdot R}\left[2(1-\mu) + \frac{z^2}{R^2}\right].
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Асфальтобетонная плита проезжей части относится к плитам средней толщины и рассматривается в трех вариантах.

1. Плита конечной или бесконечной длины на упруго-податливом полупространстве – модель Ю.Н. Работнова. При изгибе такой плиты прогиб с учетом «паразитивного» явления в плите и полупространстве (рис. 2) равен:

$$Y = \frac{M}{2\alpha^2 \cdot EJx} + \frac{Q}{2\alpha^3 EJ}, \qquad (6)$$

где $Q = \frac{dM}{dx}$; M – изгибающий момент от силы $P = P_i \cdot x$.

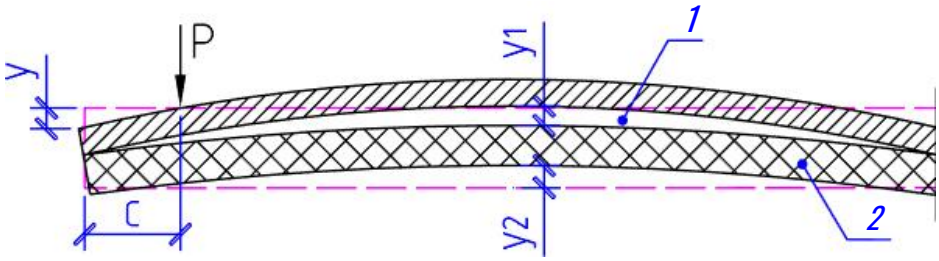


Рис. 2. Изгиб полубесконечной плиты на упруго-податливом полупространстве при $y_1 = y_2$:
1 – плита; *2* – полупространство
Fig. 2. Bending of a semi-infinite slab on elastic half-space at $y_1 = y_2$:
1 – slab; *2* – half-space

«Паразитивное» явление для плиты, для полупространства и для деформирования упругих связей носит деструктивный характер, влияет на сдвигоустойчивость слоев покрытия и отрыв от упруго-податливого полупространства (рис. 3) [8].

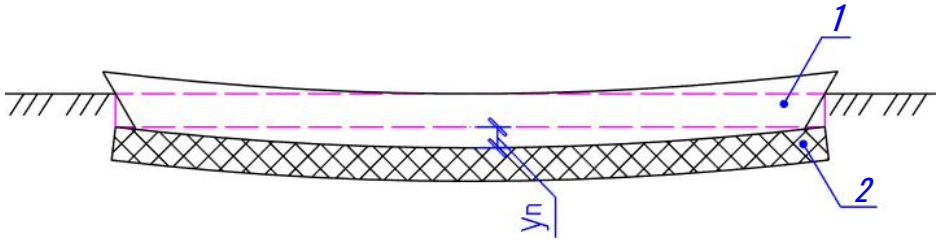


Рис. 3. Расчетная схема плиты с учетом «паразитивного» изгиба полупространства:
1 – плита; *2* – полупространство
Fig. 3. Calculation scheme of the slab with parasitic bending of half-space:
1 – slab; *2* – half-space

2. Плита неограниченной (бесконечной) длины на упруго-податливом полупространстве [9].

Реакция упруго-податливого полупространства пропорциональна прогибу. В этом случае имеет место равенство вида

$$g = -C \cdot y, \qquad (7)$$

где g – реакция, распределенная по длине плиты, равна $\frac{P}{l_п}$; $l_п$ – расчетная длина плиты; $C \cdot y$ – реакция упруго-податливого полупространства; C – расстояние от нагрузки P до края плиты.

Расчетная схема в виде двухслойной среды, состоящей из одного или двух слоёв, лежащей на слое упруго-податливого полупространства из ограниченного по высоте слоя щебня или другого материала, является условием совершенствования расчета в упругой и упругопластической стадиях работы. Щебеночное основание под асфальтобетонной плитой как упруго-податливое полупространство представляет собой «эталонную модель» для решения контактных задач при воздействии статических и динамических нагрузок. В этом случае процесс нагружения можно считать равновесным – в каждый момент времени нагружения соблюдается условие равновесной равнонапряженности, для которой справедливы статические методы механики деформированного тела. Это упрощение в дальнейшем способствует достижению «местного предельного» равновесия по сдвигу в одном элементе либо на границе плиты и упруго-податливого полупространства и отождествляется с предельным состоянием дорожной одежды. Перемещение слоев в плоскости их контакта будет означать появление максимальных активных напряжений сдвига, формулы (4), (5). Как известно, упругость, вязкость и пластичность многих материалов, особенно геологического происхождения (грунты, пески, скальные породы), нельзя ассоциировать с законом Гука и поверхностью пластического течения Губера – Мизеса – Генки, для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции «плита – упругие связи – упруго-податливое полупространство» необходимо использовать известные законы ортогональности и постулат Друкера [10, 11]. Ввиду малости деформаций плиты, по сравнению с её толщиной, для плиты средней толщины возможно условие, что уравнения деформаций и перемещений нелинейных параллельных осей OZ принимают вид

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon(x, z); \\ y &= y(x, z). \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

В этом случае соотношения между «напряжениями и деформациями» могут быть записаны в виде

$$\left.\begin{aligned} \sigma_i &= (\sigma_{ij} - \delta_{II} \cdot \sigma_0); \\ \varepsilon_i &= (\varepsilon_{ij} - \delta_{II} \cdot \varepsilon_0), \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

где σ_{ij} – девиатор напряжений – характеризует, насколько заданное напряженное состояние отличается (отклоняется) от объемного; $\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$; $\sigma_{ij} \cong \sigma_0$. δ_{II} – символ Кронекера при использовании ортогональной системы в декартовых координатах: $\delta_{II} = 1$ при $\sigma_{ij} = \sigma_0$; $\delta_{II} = 0$, если $\sigma_{ij} \neq \sigma_0$; ε_{ij} – компонента девиатора деформаций. Для упругого тела достаточными являются зависимости

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2Q}\left(\sigma_{ij} - \delta_{\text{II}}\frac{3\mu}{1+\mu}\sigma_0\right); \\ \varepsilon_0 &= \frac{1}{2Q}\left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3}\right); \\ \sigma_{ij} &= 3G\cdot\varepsilon_{ij}, \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

где $G = \frac{E}{3}$.

Для асфальтобетонной плиты зависимость между σ_i (напряжением), ε_i (деформацией) и скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$, как для упруговязкого материала, может быть принята в виде

$$\sigma_i = E\cdot\varepsilon_i + E\cdot\varepsilon_i = 2G\cdot\dot{\varepsilon}_i, \qquad (11)$$

где $G = \frac{E}{2}$; $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость деформации.

Для плиты средней толщины из упруговязкого пластического материала рассматриваются два случая. Первый – плита нагружается силами P_i от проходящего транспорта; второй – плита разгружается после ухода транспорта с расчетного участка плиты. Принимаем в расчет $E_{\text{дл}} = E$ – длительный модуль упругости, равен модулю Юнга, и $E_{\text{м}} > E$ – мгновенный модуль. Тогда в процессе нагружения закон деформированного состояния во времени для упруго-вязкого тела действует при условии

$$\sigma_i = E\cdot\varepsilon + E_{\text{м}}\cdot n\cdot\varepsilon_i, \qquad (12)$$

где $n = \frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{дл}}}$ – коэффициент вязкости; $E_{\text{дл}} = 2G$; $G = \frac{E_{\text{м}}}{2}$.

Если в некоторый момент времени $t_0 - t_i$ после ухода нагрузки происходит процесс разгрузки, то плита, получив предварительные деформации удлинения (укорочения), будет следовать закону

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0\cdot e^{\frac{-E(t_0-t_i)}{E_{\text{м}}\cdot n}}, \qquad (13)$$

где ε_0 – начальная (исходная) деформация в теле при $t = t_0$.

Когда нагрузка имеет постоянную скорость изменения при $t = 0$, $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_{\text{м}}}$.

При $t = t_i$ выражение трансформируется и имеет вид

$$\sigma_t = E_{\text{м}}\cdot\varepsilon_i. \qquad (14)$$

Двухслойная асфальтобетонная плита средней толщины изгибается не только под действием конкретных сил от временной нагрузки в зависимости от граничных условий, но и от сил срединной плоскости, расположенной между слоями $h_{\text{в}}$ и $h_{\text{н}}$ или посредине каждого слоя. Это позволяет для плит средней толщины при $h_{\text{пл}} \le \frac{1}{5}b_{\text{пл}}$ учитывать деформации срединной плоскости, умень-

шая погрешности в расчетах на величины $\frac{h_{пл}^2}{b_{пл}^2}$ по сравнению с единицей. Для плиты прямолинейной с нормальными деформациями в срединной плоскости в процессе нагружения происходит процесс искривления (рис. 4, *а*, *б*) так, что деформации сдвига по толщине плиты изменяются по параболическому закону (квадратной параболы), и выражение для нормальных напряжений по высоте σ_z принимается равным:

$$\sigma_z = \frac{P_i}{2}\left(1 - 3\frac{z}{h_{пл}} + 4\frac{z^2}{h_{пл}^2}\right). \qquad (15)$$

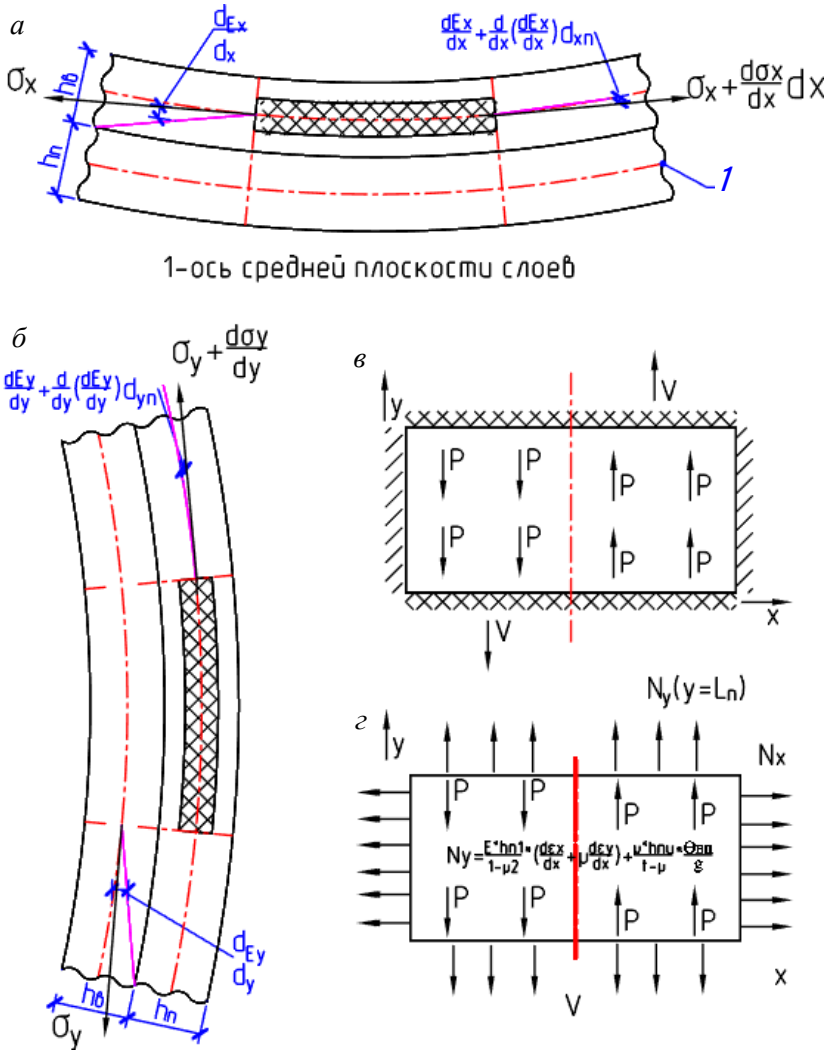


Рис. 4. Изгиб двухслойной плиты от сил в срединной плоскости:
а, *б* – от действия поперечных сил; *в*, *г* – от действия сдвиговых сил
Fig. 4. Bending of a two-layer slab due to median plane forces:
a, *b* – transverse forces; *c*, *d* – shear forces

Нормальные напряжения при интегрировании ε_z по z будут равны:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{\text{ср}} + \frac{\mu}{1-\mu}\frac{z^2}{2}\gamma_{\text{сдв}}, \tag{16}$$

где $\varepsilon_{\text{ср}}$ – перемещение в срединной плоскости в функции x, y, z; $\gamma_{\text{сдв}}$ – некоторая функция сдвига.

Для плит, обладающих жесткостью на изгиб $E \cdot J_n$, влиянием сил, направленных перпендикулярно срединной плоскости, пренебрегаем [12]. Таким образом, функция интенсивности деформации срединной плоскости будет иметь вид

$$f\left(\varepsilon_i\right) = \lambda\left(1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\text{ср}}}\right), \tag{17}$$

где $\lambda = 1 - \frac{G}{E}$ – параметр некоторого разупрочнения материала в плите. Тогда напряжения в плите с учетом напряжений и деформаций срединной плоскости запишутся в виде

$$\sigma_i = E\left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{\text{ср}}}\right)\left(1 - \frac{G}{E}\right)\right]\varepsilon_i, \tag{18}$$

где $\varepsilon_i = \frac{\sigma_T}{E'}$; E' – секущий модуль деформации.

При совместном действии поперечных и продольных сил в срединной плоскости в виде сдвига плоскостей необходимо иметь уравнение равновесия взаимосвязи от влияния поперечных нагрузок P_i на деформацию в срединной плоскости, которое рассматривается в нелинейной теории упругости.

При составлении уравнения равновесия проекции напряжений σ_x на ось x, σ_y на ось y, σ_z на ось z, касательных с учетом уклона изогнутой срединной плоскости τ_{xy} на ось oz и oy, при $z = \frac{h_{\text{пл}}}{2}$ и $z = h_{\text{пл}}$ значения σ_x, σ_y, τ_{xz} будут соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{GM'_x}{h_{\text{пл}}^2}; \\ \sigma_y &= \frac{GM_y}{h_{\text{пл}}^2}; \\ \tau_{xz} &= \frac{3}{2}\frac{Q_x}{h_{\text{пл}}}, \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

где $$M'_x = \int_{-\frac{h_{\text{пл}}}{2}}^{\frac{h_{\text{пл}}}{2}} \sigma_x \cdot \psi_z \cdot d_z;$$

$$\psi_z = \frac{2-\mu}{1-\mu}\frac{z^3}{6} - \frac{2}{1-\mu}\frac{h_{пл}^2}{8};$$

$$Q_x = \int_{-\frac{h_{пл}}{2}}^{\frac{h_{пл}}{2}} \tau_{yz}\frac{d\psi_z}{dz}d_z.$$

Значения интенсивности сил, действующих в срединной плоскости N_x, N_y, N_z, соответственно равны, кг/м:

$$N_x = \int_{-\frac{h_{пл}}{2}}^{\frac{h_{пл}}{2}} \sigma_{xz}dz; \quad N_y = \int_{-\frac{h_{пл}}{2}}^{\frac{h_{пл}}{2}} \sigma_y dy; \quad N_{xz} = \int_{-\frac{h_{пл}}{2}}^{\frac{h_{пл}}{2}} \tau_{xz}dz. \qquad (20)$$

Деформации асфальтобетонной плиты на упруго-податливом основании с учетом частичного отрыва плиты от основания, а также влияние её анизатропности и «паразитивности» в процессе эксплуатации определяются по формулам ε_x, ε_y, ε_z, γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{xz} и представлены в таблице.

$$\varepsilon_x = a_{11}\cdot\sigma_x + a_{12}\cdot\sigma_y + a_{13}\cdot\sigma_z + a_{14}\cdot\tau_{xy} + a_{15}\cdot\tau_{yz} + a_{16}\cdot\tau_{zx};$$

$$\varepsilon_y = a_{21}\cdot\sigma_x + a_{22}\cdot\sigma_y + a_{23}\cdot\sigma_z + a_{24}\cdot\tau_{xy} + a_{25}\cdot\tau_{yz} + a_{26}\cdot\tau_{zx};$$

$$\varepsilon_z = a_{31}\cdot\sigma_x + a_{32}\cdot\sigma_y + a_{33}\cdot\sigma_z + a_{34}\cdot\tau_{xy} + a_{35}\cdot\tau_{yz} + a_{36}\cdot\tau_{zx};$$

$$\gamma_{xy} = a_{41}\cdot\sigma_x + a_{42}\cdot\sigma_y + a_{43}\cdot\sigma_z + a_{44}\cdot\tau_{xy} + a_{45}\cdot\tau_{yz} + a_{46}\cdot\tau_{zx};$$

$$\gamma_{yz} = a_{51}\cdot\sigma_x + a_{52}\cdot\sigma_y + a_{53}\cdot\sigma_z + a_{54}\cdot\tau_{xy} + a_{55}\cdot\tau_{yz} + a_{56}\cdot\tau_{zx};$$

$$\gamma_{xz} = a_{61}\cdot\sigma_x + a_{62}\cdot\sigma_y + a_{63}\cdot\sigma_z + a_{64}\cdot\tau_{xy} + a_{65}\cdot\tau_{yz} + a_{66}\cdot\tau_{zx}.$$

Деформации, мм	Напряжения, МПа					
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{zx}
ε_x	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}
ε_y	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}
ε_z	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}
γ_{xy}	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}	a_{45}	a_{46}
γ_{yz}	a_{51}	a_{52}	a_{53}	a_{54}	a_{55}	a_{56}
γ_{xz}	a_{61}	a_{62}	a_{63}	a_{64}	a_{65}	a_{66}

При $a_{12} = a_{21}$, $a_{13} = a_{31}$, $a_{14} = a_{41}$, $a_{15} = a_{51}$, $a_{16} = a_{61}$,
$a_{23} = a_{32}$, $a_{24} = a_{42}$, $a_{25} = a_{52}$, $a_{26} = a_{62}$, $a_{34} = a_{43}$,
$a_{35} = a_{53}$, $a_{36} = a_{63}$, $a_{45} = a_{54}$, $a_{46} = a_{64}$, $a_{56} = a_{65}$,
$a_{11} = \frac{1}{E}$, $a_{12} = -\frac{\mu}{E}$, $a_{22} = a_{33} = a_{11}$.

Таким образом, учет деформирования срединной плоскости плиты позволяет для анизотропных тел вести подсчет напряжений по формуле

$$\sigma_i = E' \cdot \varepsilon_i, \tag{21}$$

где $E' = \mathrm{tg}\alpha$ – секущий модуль деформации 1-го рода.

С учетом сдвига формула (21) принимает вид

$$\frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_i = G'\sqrt{2}\,\varepsilon_i, \tag{22}$$

где $G' = \mathrm{tg}\beta = \frac{1}{3}E'$ – модуль деформации 2-го рода при сдвиге.

Соотношение между деформациями и напряжениями в физическом законе деформирования представим в виде

$$\sigma + n \cdot \sigma = E \cdot \varepsilon + E_{\text{м}} \cdot n \cdot \varepsilon_i, \tag{23}$$

где $n = \frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{дл}}}$ – коэффициент вязкости; $E_{\text{дл}}$ – длительный модуль упругости, $E_{\text{дл}} \approx E$; $E_{\text{м}}$ – мгновенный модуль упругости, $E_{\text{м}} > E_{\text{дл}}$.

Для упруго-вязко-пластического состояния материала асфальтобетонной плиты справедливо равенство

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{уп}} + \varepsilon_{\text{пл}} = \frac{1}{3E_{\text{v}}} d\sigma, \tag{24}$$

где E_{v} – объемный модуль деформации, равен:

$$\frac{E}{3(1-2\mu)} \approx 0{,}84E; \qquad \sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}.$$

Приращение неупругих деформаций и напряжений с удалением от места приложения нагрузки для плиты, в том числе и срединной плоскости, удобно определить с использованием так называемой «поверхности неупругой жесткости», представляющей собой геометрию всех мест приращения деформаций и напряжений $d\varepsilon_i$ и $d\sigma_i$, пропорциональных касательному пластическому модулю неупругих деформаций $G_{\text{пл}}$ и касательному модулю неупругих напряжений E^*, симметричных между собой в стадии приращения неупругих деформаций из равенства

$$\left.\begin{aligned} d\varepsilon_i &= 2G'_{\text{пл}} \cdot d\varepsilon_{\text{пл}}; \;\; G'_{\text{пл}} = \frac{E}{2}; \\ d\sigma_i &= E^* \cdot d\sigma_{\text{пл}} = 3E_{\text{v}} \cdot d\varepsilon_{\text{пл}}. \end{aligned}\right\} \tag{25}$$

Введем коэффициент β, характеризующий пластические свойства асфальтобетона, равный 2. Тогда неупругие деформации начнут проявляться и развиваться при нагрузке P, равной

$$P = P_T = \frac{\sigma_i(\sigma_T)A}{f \cdot \beta \cdot h_{\text{пл}} \dfrac{A}{2J_{\text{пл}}}}, \tag{26}$$

где $h_{\text{пл}}$ – высота расчетного слоя плиты; A – площадь поперечного сечения плиты; f – прогиб плиты от P_T; $J_{\text{пл}}$ – момент инерции сечения плиты.

Используя метод упругих решений А.А. Ильюшина, теории малых упругопластических деформаций и диаграмм «σ_i – ε_i» Прандтля, для состояния $\varepsilon_{ср}$ запишем условие

$$\left.\begin{aligned} \sigma_i - \sigma_0 &= \frac{2G_{пл}}{\psi_{пл}}\left(\varepsilon_i - \varepsilon_0\right); \\ \tau_{xy} &= \frac{G'_{пл}}{\psi_{пл}}\gamma_{xy}, \end{aligned}\right\} \tag{27}$$

где $\psi_{пл}$ – функция пластичности на поверхности «неупругой жесткости» плиты, равная

$$\psi_{пл} = 1 + \frac{3}{2}\frac{E^* \cdot \varepsilon_{пл}}{\sigma_i\left(1+\mu\right)};$$

где $$E^* = \frac{E}{1+\dfrac{\sigma_i}{\sigma_T}},\ G_{пл} = \frac{G}{1+\dfrac{\sigma_i}{\sigma_T}},\ G = \frac{E}{2};$$

μ – коэффициент Пуассона; $\sigma_i = \sigma_T$, $\varepsilon_{пл} = 0{,}011$.

Значения интенсивности пластических деформаций, по данным А.И. Биргера, приняты в виде

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{пл} &= 2\sigma_i\left(\psi_{пл} - 1\right)\left(\frac{1+\mu}{3E}\right); \\ \sigma_{пл} &= \frac{E}{1+\dfrac{\nu \cdot \varepsilon_{пл}}{\varepsilon_T}}\left[\varepsilon_i - \varepsilon_{пл}\left(1-\nu\right)\right], \end{aligned}\right\} \tag{28}$$

если $\nu = 1$, то $E = E^*$.

График зависимости E^* в функции нагрузки P изображен на рис. 5.

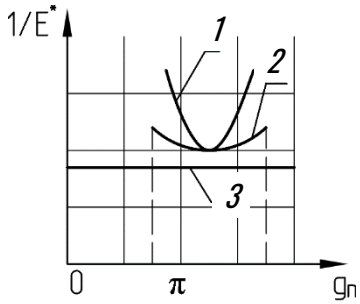


Рис. 5. Зависимость модуля E^* от нагрузки:
1 – по теории пластичности; *2* – с учетом упрочнения; *3* – с учетом анизотропии

Fig. 5. Dependence of elastic modulus on load:
1 – according to plasticity theory; *2* – accounting for hardening; *3* – accounting for anisotropy

Для асфальтобетонной плиты прямоугольной формы с размерами: a – ширина плиты, b – длина – предельная нагрузка, отвечающая предельным значениям пластической деформации $\varepsilon_{пл} = 0{,}011$, будет определяться по формуле [13]:

$$P_{пр} = 4M_T\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) = 1{,}112 \cdot 4\pi M_T, \tag{29}$$

где $M_T = \sigma_T \dfrac{h_{пл}}{4}$.

Пример: рассмотрим изгиб прямоугольной асфальтобетонной плиты средней толщины $h_{пл} = h_1 + h_2 = 0{,}08 + 0{,}04 = 0{,}12$ м, у которой два противоположных края свободно оперты, а два других – условно-упруго защемлены – пример Э. Рейснера (рис. 6).

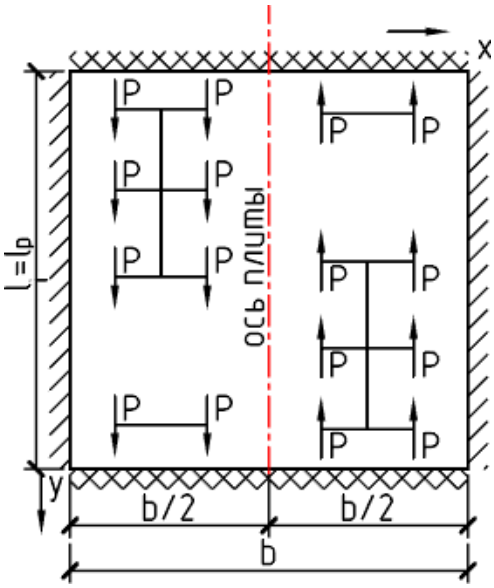


Рис. 6. Расчетная схема плиты конечной длины:
b – ширина плиты; $l_р$ – расчетная длина плиты
Fig. 6. Design scheme of finite length slab:
b – slab width; $l_р$ – calculated slab length

Изгибная жесткость асфальтобетонной плиты равна $EJ_u = \dfrac{E_{пл} h_2^3}{12(1-\mu)}$, $\mu = 0{,}5$. Временную автомобильную нагрузку, действующую на плиту, приводим к равномерно распределенной полосой $g_{вр} = 5{,}0$ т/м.

Функция прогиба $y(x, y)$ и функция сдвига $\gamma_{сдв}(x, y)$ имеют вид

$$y(x,y) = \sum_{n=1}^{\infty} X_i(x) \sin\frac{k\pi y}{l} + \frac{8-3\mu}{1-\mu}\frac{h_{пл}^2}{40}\frac{g_{вр}}{EJ_n}\frac{y(l-y)}{2};$$

$$\gamma_{сдв}(x,y) = \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_{сдв}(x) \sin\frac{k\cdot\pi\cdot x}{l},$$

где

$$X_i(x) = \frac{4g_{вр}\cdot l^4}{k^5\cdot\pi^5 EJ_{пл}}.$$

Граничные условия:

– для свободного края: $y = 0$, $y = l$, $f = \dfrac{d^2y}{dy^2} = 0$,

$$\gamma_{\text{сдв}} = 0,\ \ \frac{d^2 y}{dy^2} = -\frac{8-3\mu}{1-\mu}\frac{h_{\text{пл}}^2}{40}\frac{d^2\gamma_{\text{сдв}}}{dy^2};$$

$$M_x = 0,\ \ Q_x = \frac{dM_x}{dx} = 0,\ \ f = 0,\ \ \gamma_{\text{сдв}} = 0;$$

– для условно-упругого защемления: при x = const прогиб $f = 0$, функция сдвига $\gamma_{\text{сдв}} = 0$, т. е.

$$\frac{dy}{dx} + \frac{8+\mu}{1-\mu}\frac{h_{\text{пл}}^2}{40}\frac{d\gamma_{\text{сдв}}}{dx} = 0;$$

$$M_x = \int_{-\frac{h_{\text{пл}}}{2}}^{\frac{h_{\text{пл}}}{2}} \sigma_x \cdot \psi_z \cdot d_z;\quad Q_x = \int_{-\frac{h_{\text{пл}}}{2}}^{\frac{h_{\text{пл}}}{2}} \tau_{yz}\frac{d\psi(z)}{dz}d_z.$$

Выводы

Совершенствование расчета асфальтобетонной плиты покрытия проезжей части на упруго-податливом полупространстве включает уточнения при решении контактной задачи Буссинеска – Фламана, кроме того, уточняются параметры напряженно-деформированного состояния конструкции «плита – упругие связи – упруго-податливое полупространство» на основе постулата Друкера от совместного действия поперечных и продольных сил.

Список источников

1. *Горбунов-Посадов М.И.* Таблицы для расчета тонких плит на упругом основании / Акад. строительства и архитектуры СССР. Науч.-исслед. ин-т оснований и подземных сооружений. Москва : Госстройиздат, 1959. 98 с.
2. *Справочник по теории упругости*. Киев : Будівельник, 1977. 418 с.
3. *Кривисский А.М.* Новые схемы для расчета нежестких дорожных одежд. Москва : Научно-техническое изд-во Министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1968. 77 с.
4. *Коган Б.И.* О применении точного решения теории упругости для многослойного полупространства к расчету нежестких дорожных покрытий // Труды ХАДИ. Вып. 21. Харьков : Изд-во ХГУ, 1958. С. 113–125.
5. *Hui D, Hansen J.S.* The Swallowtail and Butterfly cuspoids and their application in the initial post-buckling of single-mode structural systems // Quarterly of Applied Mathematics. 1980. V. 38. № 1. P. 17–36.
6. *Bazant Z.P.* Endochronic Inelasticity and Incremental Plasticity // International Journal of Solids and Structures. 1978. V. 14. P. 691–714.
7. *Пратусевич Я.А., Мещеряков В.Б.* О приведении двухмерных и трехмерных задач теории упругости к задачам одномерным и двухмерным // Вопросы механики. Труды МИИТ. Вып. 164. Москва : Высшая школа, 1963. С. 5–15.
8. *Drucker D.C.* Some implication of work hardening and Ideal Plasticity // Quarterly of Applied Mathmatics. 1950. V. 7. P. 411–418.
9. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. Москва : Машиностроение, 1975. 399 с.
10. *Лукаш П.А.* Основы нелинейной строительной механики. Москва : Стройиздат, 1978. 204 с.

11. *Чернышов А.И., Алексеев А.А., Мокшин Д.И., Гаусс К.С., Тарбеева Ю.В.* Асфальтовый бетон повышенной водо- и морозостойкости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1. С. 180–189.
12. *Ибрахим Раванд Абдуллах*. Анализ методов расчета деформаций нежёстких дорожных одежд // Молодой ученый. 2016. № 30 (134). С. 75–83. URL: https://moluch.ru/archive/134/37438/ (дата обращения: 24.01.2025).
13. *Углова Е.В., Шило О.А.* Анализ критериев расчета нежестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока // Транспортные сооружения : интернет-журнал. 2018. № 3. URL: https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf. DOI: 10.15862/14SATS318

References

1. *Gorbunov-Posadov M.I.* Tables for Calculating Slabs on Elastic Foundation. Moscow: Gosstroiizdat, 1959. 98 p. (In Russian)
2. Theory of Elasticity Handbook. Kyiv: Budivelnik, 1977. 418 p. (In Russian)
3. *Krivisskii A.M.* New Schemes for Calculating Flexible Road Surfaces. Moscow, 1968. 77 p. (In Russian)
4. *Kogan B.I.* Application of Exact Solution of Theory of Elasticity for Multilayer Half-Spaces to Calculate Non-Rigid Pavements. Trudy KhADI. Vol. 21. Kharkov, 1958. Pp. 113–125. (In Russian)
5. *Hui D., Hansen J.S.* The Suallowtail and Batterfly Cuspoids Application in the Initial Post-Buckling of Single-Mode Structural Systems. *Quaterly of Applied Mathematics*. 1980; 38(1): 17–36.
6. *Bazant Z.P.* Endochronic Inelasticity and Incremental Plasticity. *International Journal of Solids and Structures*. 1978; 14: 691–714.
7. *Pratusevich Ya.A., Meshcheryakov V.B.* Reduction of Two- and Three-Dimensional Problems of Elasticity Theory to One- and Two-Dimensional Problems. In: Problems of Mechanics. Trudy MIIT. Vol. 164. Moscow: Vysshaya shkola, 1963. Pp. 5–15. (In Russian)
8. *Drucker D.C.* Some Implication of Work Hardening and Ideal Plasticity. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1950; 7: 411–418.
9. *Malinin N.N.* Applied Theory of Plasticity and Creep. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 398 p. (In Russian)
10. *Lukash P.A.* Fundamentals of Nonlinear Structural Mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1978. 204 p. (In Russian)
11. *Chernyshov A.I., Alekseev A.A., Mokshin D.I., Gauss K.S., Tarbeeva Yu.V.* Asphalt concrete with increased water and frost resistance. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; (1): 180–189. (In Russian)
12. *Ibrahim, Ravand Abdullah*. Strength Analysis of Non-Rigid Road Pavements. *Molodoi uchenyi*. 2016; 30 (134): 75–83. Available: https://moluch.ru/archive/134/37438 / (accessed January 24, 2025). (In Russian)
13. *Uglova E.V., Shilo O.A.* Strength Analysis of Non-Rigid Road Pavements under Heavy Traffic. *Transportnye sooruzheniya*. 2018; (3). DOI: 10.15862/14SATS318 (In Russian)

Сведения об авторах

Чернышова Наталья Анатольевна, канд. геол.-мин. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tisi20080611@mail.ru

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alekseev10@yandex.ru

Банников Алексей Андреевич, ассистент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lexsew@mail.ru

Authors Details

Natalya A. Chernyshova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tisi20080611@mail.ru

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru

Aleksei A. Bannikov, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lexsew@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 05.12.2024
Одобрена после рецензирования 24.12.2024
Принята к публикации 17.01.2025

Submitted for publication 05.12.2024
Approved after review 24.12.2024
Accepted for publication 17.01.2025