

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

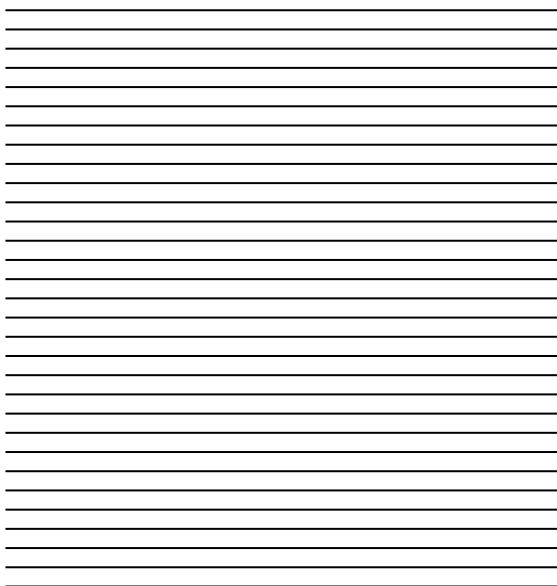
ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Том 27

№ 6 2025
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся 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; beckker.ait@dvfu.ru
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России, г. Москва; niiitag@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
Галыутдинов З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; z.galyaudinov@tsuab.ru
Гныры 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; svefimenco_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
Ильинев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН, г. Москва; ilyichev@raasn.ru
Каприлов С.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. лабораторией НИИЖБ, г. Москва; kaprilev@masterbeton-mb.ru
Копанина Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; koranitsa@mail.ru
Кудяков А.И., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; kudyakov@tsuab.ru
Кумпик О.Г., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; kumprak@yandex.ru
Лотов В.А., докт. техн. наук, профессор кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туинского политехнического университета, г. Турин, Италия; lucia.iantilis@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@mail.ru
Орзобеков 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; eleni@vtomske.ru
Сколовович 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, Республики Казахстан; bagdatb@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 теплогоазоснабжения 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; niiif@niiif.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](http://iprbookshop.ru), а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tsuab.ru>

Научное издание
ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА № 6 – 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 А.А. Вильт, Т.С. Володина, Е.А. Кулешова. Переводчик М.В. Воробьевы. Дизайн Е.И. Кардаш.

Технический редактор Н.В. Удлер.

Подписано в печать 22.12.2025. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.

Дата выхода: 26.12.2025.

Уч.-изд. л. 21,74. Усл. печ. л. 25,81. Тираж 200 экз. Заказ № 69.

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



© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2025

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

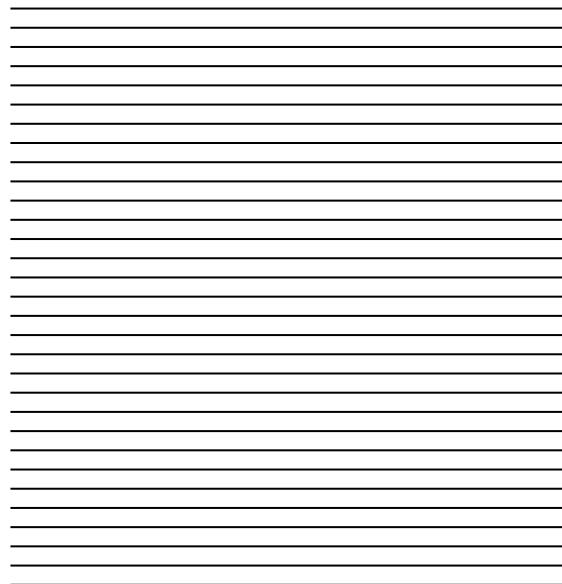
VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL
OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 27

№ 6 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 StadO, 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; chupinrv@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
Efimenco V.N., DSc, Professor, Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; svefimenco_80@mail.ru
Efimenco S.V., DSc, Head of Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; svefimenco@tsuab.ru
Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia; esaulovgv@raas.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; rsp_ngasu@mail.ru
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow, Russia; ilyichev@raasn.ru
Kapriev S.S., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Laboratory at Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia; kapriev@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@ipu.ru
Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE, Saint-Petersburg, Russia; morozov@sphgasu.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; ovsn@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
Sitimkova E.V., DArts, A/Professor, Restoration and Renovation of Architectural Heritage Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; elensi@vtomske.ru
Shubenchikov M.V., DArts, Professor, Head of Urban Planning Dept., Moscow Architectural Institute (State Academy), RAACS Vice President, Moscow, Russia; shubenchikov@gmail.com
Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS, Moscow, Russia; niisf@niisf.ru
Teltava B.B., DSc, Professor, Academician, National Academy of Engineering of Kazakhstan and International Academy of Transport, Almaty, Kazakhstan; bagdaih@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., Politechnic 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 ARKHITEKTONO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 6 – 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 A.A. Vil't, T.S. Volodina, E.A. Kuleshova. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udlar.
Passed for printing: 22.12.2025. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman. Issue date: 26.12.2025.
Published sheets: 21,74. Conventional printed sheets: 25,81. Print run: 200 copies. Price: free.
Order N 69.

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



© Tomsk State University
of Architecture and Building, 2025

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Романова Л.С., Касимова А.В., Коптева Е.М. К вопросу сохранения деревянной архитектуры Томска	9
Еремеева А.Ф., Бусуёк А.Ю., Резайкин И.В. Концепция современного строительства с сохранением архитектурной идентичности города Архангельска	22
Абаимова Е.Л., Чегге В.С. Роль жителей в формировании городского бренда	35
Ермолаева Я.И., Кошечкина А.С., Смолина О.О. Формирование карт совместимости растений Западно-Сибирского региона для городских ландшафтов ..	48
Максатова А.М., Карелин Д.В. Влияние природно-климатических факторов на типологические особенности жилища тюркских народов	65
Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю. Определение номенклатуры помещений для зданий общеобразовательных школ с инклюзивными траекториями обучения детей с РАС	78
Огиенко Е.Л., Гарькин И.Н., Колесников А.А. Архитектурные решения муниципального жилища в Испании	90
Щуров Г.А. Современная архитектура в историческом городе. Проблемы и решения	103

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Овсянников С.Н., Овсянников М.С. Математическое моделирование распространения звука в здании.....	117
Арленинов П.Д. Дефектоскопия бетона конструкций с внешней стальной оболочкой на основе законов переноса тепла в материале.....	141

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Лукашевич О.Д., Осипова Е.Ю. Экономические, социальные и экологические аспекты проблемы транспортировки воды по изношенным сетям на примере крупного сибирского города.....	157
--	-----

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Шеховцов В.В., Семеновых М.А., Улмасов А.Б., Дятчина Д.С., Анисимова Е.А. Оптимизация синтеза муллита в плазменно-дуговом разряде и сравнительный анализ спекания керамики на основе природного сырья и чистых оксидов	172
Горохов Т.И., Ерофеев А.В., Ковалев Н.С. Анализ изменения структуры древесно-гипсового композитного материала при добавлении в его состав цемента	187

Наумова Л.Н. Изменение химического состава эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции на основе модифицированных волокон хризотила	197
Мананков А.В. Особенности нано-мезоструктурной динамики в стеклах при создании новых материалов	212

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

Алексеев А.А., Картопольцев А.В. Совершенствование расчета несущих балок трубчатого сечения пролетных строений металлических мостов.....	227
Гладышева О.В., Алимова Н.Ю., Бончева Е.А., Миронова Е.В. Моделирование работы однопанельных и двухпанельных снегозадерживающих заборов во время метелей.....	242
Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Улучшение характеристик асфальтобетонных покрытий путем их дисперсного армирования	257
Смердов Д.Н., Ящук М.О. Обоснование методики расчета железобетонных главных балок мостов с преднатяжением композитными материалами в качестве материала усиления.....	272

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Зубкова О.А. Экомониторинг территории Парабельского района Томской области	282
--	-----

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Romanova L.S., Kasimova A.V., Kopteva E.M. Towards Preservation of Tomsk Wooden Architecture.....	9
Eremeeva A.F., Busuek A.Yu., Rezaikin I.V. Modern Construction Concept of Preservation of Architectural Identity in Arkhangelsk	22
Abaimova E.L., Chegge V.S. The Role of Residents in the Urban Brand Formation	35
Ermolaeva Ya.I., Koshechkina A.S., Smolina O.O. Mapping of West Siberian Plant Consistency for Urban Landscapes.....	48
Maksatova A.M., Karelina D.V. Influence of Natural and Climatic Factors on Typology of Turkic Houses	65
Chebereva O.N., Strel'nikova E.Yu. Classification of Premises for Buildings of General Education Schools with Inclusive Educational Trajectories for Children with ASD	78
Ogienko E.L., Gar'kin I.N., Kolesnikov A.A. Architectural Solutions for Municipal Housing in Spain	90
Shchurov G.A. Modern Architecture in a Historical City. Problems and Solutions	103

BUILDING AND CONSTRUCTION

Ovsyannikov S.N., Ovsyannikov M.S. Mathematical Simulation of Sound Propagation in a Building	117
Arleninov P.D. Non-Destructive Testing of Concrete Structure with Outer Steel Shell using Heat Transfer Principles.....	141

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Lukashevich O.D., Osipova E.Yu. Economic, Social and Ecological Aspects of Water Transportation through Worn-Out Networks in a Large Siberian City.....	157
--	-----

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Shekhovtsov V.V., Semenovych M.A., Ulmasov A.B., Dyatchina D.S., Anisimova E.A. Optimization of Mullite Synthesis in Arc Discharge Plasma and Comparison of Ceramics Sintering Based on Natural Raw Material and Pure Oxide	172
Gorokhov T.I., Erofeev A.V., Kovalev N.S. Analysis of Cement-Modified Structure of Wood-Gypsum Composite	187

Naumova L.N. Chemical Composition of Epoxy-Polyester Powders Based on Modified Chrysotile Fiber.....	197
Manankov A.V. Dynamics of Glass Nano-Mesostructure in Creating New Materials.	212

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

Alekseev A.A., Kartopol'tsev A.V. Improvement of Load-Bearing Tubular Beam Section Analysis of Bridge Spans.....	227
Gladysheva O.V., Alimova N.Yu., Boncheva E.A., Mironova E.V. Modeling of Single- and Double-Panel Walls against Snowdrifts	242
Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Performance Improvement of Asphalt Concrete Pavements by Fiber Reinforcement.....	257
Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Calculation Technique of Reinforced Concrete Bridge Beams Reinforced by Prestressed Composite Materials	272

CONSTRUCTION AND URBAN ECOLOGICAL SECURITY

Otmakhov V.I., Sarkisov Yu.S., Zubkova O.A. Ecological Monitoring of Parabelsky Urban Zone of the Tomsk Region.....	282
--	-----

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 9–21.

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 (6): 9–21.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.424

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-9-21

EDN: AFQPDL

К ВОПРОСУ СОХРАНЕНИЯ ДЕРЕВЯННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ТОМСКА

**Лариса Степановна Романова, Александра Владимировна Касимова,
Елизавета Михайловна Коптева**
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена угрозой утраты деревянной застройки второй половины XIX – начала XX в., представляющей уникальное явление мировой культуры, в исторических районах г. Томска: Заозерье, Пески, Воскресенская гора, Кирпичи, Болото, Уржатка, Юрточная гора, Заисточье, Елань.

Цель работы – ввести в научный оборот материалы, полученные в результате обследования исторических районов Томска, для выявления неэксплуатируемой деревянной застройки и сбора информации о ее состоянии, форме собственности, степени сохранности первоначального облика.

Новизна исследования заключается в получении актуальных данных о неэксплуатируемых объектах, их классификации и количественной оценке, что позволяет получить объективную картину текущей ситуации и выявить факторы, способствующие утрате ценного архитектурного наследия, формирующего архитектурно-художественное своеобразие Томска – исторического поселения федерального значения.

Авторы делают акцент на значимости определения научно обоснованной функции для сохранения неэксплуатируемой деревянной застройки, позволяющей привлечь инвесторов.

Результаты исследования основаны на комплексном подходе, включающем работу с архивными, библиографическими источниками и интернет-ресурсами, натурное обследование, анализ и систематизацию полученных материалов. Это позволило авторам обосновать реально сложившуюся ситуацию со степенью сохранности деревянной архитектуры Томска и предложить рекомендации для органов власти и управления охраной памятников, направленные на предотвращение утраты массивов исторической деревянной застройки.

Ключевые слова: архитектурно-художественное своеобразие, угроза утраты, сохранение наследия, исторический центр, массивы деревянной застройки, расселенные здания, приспособление

Для цитирования: Романова Л.С., Касимова А.В., Коптева Е.М. К вопросу сохранения деревянной архитектуры Томска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 9–21. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-9-21. EDN: AFQPDL

ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS PRESERVATION OF TOMSK WOODEN ARCHITECTURE

Larisa S. Romanova, Aleksandra V. Kasimova, Elizaveta M. Kopteva
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The risk of loss of wooden buildings created late in the 19th and early 20th centuries, determines the topic of this work, as these are buildings of the unique architecture built in the historical districts of Tomsk such as Zaozerye, Peski, Voskresenskaya Gora, Kirpichi, Boloto, Urzhatka, Yurtochnaya Gora, Zaistochye, Elan.

Purpose: The purpose of this work is to introduce the obtained data into the scientific circulation using a survey of historical districts in Tomsk, identify wooden buildings out of operation and collect information about their ownership, preservation, and technical condition. The paper emphasizes the importance of defining a scientifically based function for preservation of unexploited wooden buildings that allows attracting investors.

Methodology: The comprehensive approach, including work from archival and bibliographic documents and the Internet, the field survey, analysis and systematization of the obtained results, allowing to scientifically substantiate the actual situation with the preservation degree of wooden architecture in Tomsk. All this allows government and monument protection agencies to take timely measures to prevent historical wooden buildings from loss.

Value: This work presents up-to-date data on unexploited buildings, proposes their classification and quantity, demonstrating the real situation with the loss of valuable architectural heritage that forms the architectural and artistic identity of Tomsk as a historical settlement of the federal significance.

Keywords: architectural style, heritage preservation, historical center, wooden building, moving people out of unsafe building

For citation: Romanova L.S., Kasimova A.V., Kopteva E.M. Towards Preservation of Tomsk Wooden Architecture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (6): 9–21. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-9-21. EDN: AFQPDL

Сибирская архитектура является одной из ярких страниц в истории России, особенно в области деревянного зодчества. Томск с богатой 400-летней историей – один из городов Сибири, который привлекает студентов и туристов, славится наукой, культурой, ландшафтами, архитектурой. Томск обладает большим стилистическим разнообразием исторической застройки. В 2010 г. старинный сибирский город получил статус исторического поселения федерального значения во многом благодаря сохранности целостных массивов деревянной застройки второй половины XIX – начала XX в. – редкого явления для крупных городов России.

Одной из наиболее сложных и актуальных проблем в современном градостроительстве является сохранение уникальности архитектурной среды в исторических поселениях. Это затрагивает национальные культурные традиции, проявленные в архитектуре; архитектурно-художественное своеобразие и атмосферу исторического поселения. Деревянное зодчество Томска отличается уникальностью и разнообразием. Деревянная архитектура оценивается специалистами как культурная и историческая ценность мирового масштаба. К настоящему времени в историческом центре Томска сохранилась деревянная застройка второй половины XIX – начала XX в. (рис. 1). Границы исторического центра по Проекту зон охраны памятников истории и культуры г. Томска 1982 г. показаны пунктиром.

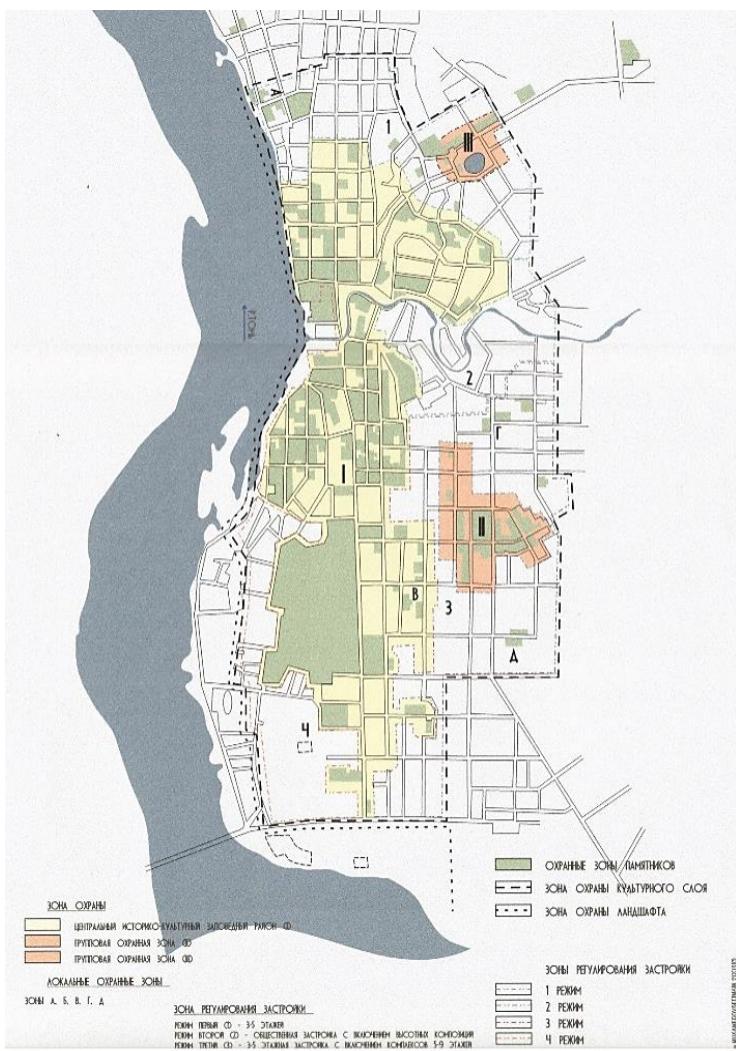


Рис. 1. Проект зон охраны объектов культурного наследия г. Томска, институт «Спецпроектреставрация», г. Москва, 1982 г.

Fig. 1. Project of protection zones of cultural heritage in Tomsk. Spetsproektrestavratsiya Institute, Moscow, 1982

Актуальность исследования связана с темой магистерской диссертации, выполненной на кафедре реставрации и реконструкции архитектурного наследия (РиРАН) Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ), и обусловлена угрозой утраты целостности массивов деревянной застройки в исторических районах Томска: Заозерье, Пески, Воскресенская гора, Кирпичи, Болото, Уржатка, Юрточная гора, Заисточье и Елань. Тему деревянного зодчества – такую многогранную, волнующую и вдохновляющую – можно назвать и самой сложной в сфере сохранения историко-культурного наследия.

Основой теоретического исследования послужили научные труды, монографии отечественных ученых, методическая литература и проектные материалы.

Истории Томска и его архитектуре посвящены исследования В.Г. Залесова, И.В. Куликовой [1], Ю.П. Нагорнова [2], Л.С. Романовой [3], Г.Н. Старицкой [4] и др. *Проблема сохранения деревянной архитектуры Томска и российских городов* отражена в исследованиях Ю.М. Гармаш [5], Е.В. Ситниковой [6, 7]. Поиску путей сохранения и адаптации деревянного зодчества к современным условиям посвящены труды С.С. Малевич, Л.С. Романовой [8, 9], Н.В. Юдиной [10] и др. *Историческая деревянная застройка в качестве ресурса для развития туризма* исследуется в работах Н.А. Лисовской [11], Д.А. Ягутьевой [12].

В начале работы была поставлена задача выявить все расселенные и «законсервированные» деревянные здания для разработки концепции их функционального использования. К этой группе относятся неэксплуатируемые объекты, доступ в которые предотвращен закрытием металлическими или деревянными щитами дверей и окон.

Натурное обследование деревянной застройки, проведенное в сентябре – декабре 2023 г. на территории вышеперечисленных исторических районов г. Томска, позволило выявить реальное количество неэксплуатируемой деревянной застройки, включающее и другие группы расселенных зданий. Согласно классификации, предложенной авторами, выявленные деревянные здания подразделяются на категории: А, Б, В, Г, Д, Е, Ж (рис. 2, 3).



Рис. 2. Категории выявленных деревянных зданий в исторических районах Заозерье, Пески, Заисточье, Елань

Fig. 2. Wooden buildings in Zaozerye, Peski, Zaistochye, and Yelan historical districts

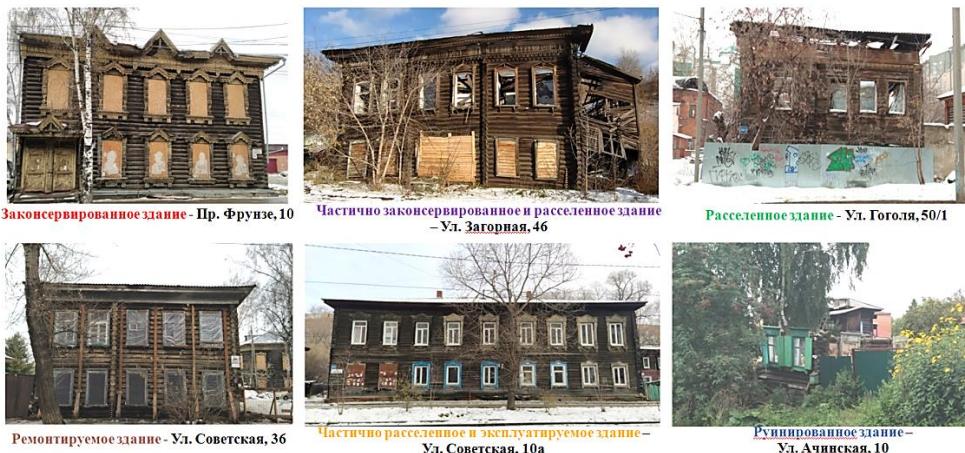


Рис. 3. Категории выявленных деревянных зданий в исторических районах Воскресенская гора, Кирпичи, Болото, Уржатка, Юрточная гора

Fig. 3. Wooden buildings in Voskresenskaya Gora, Kirpichi, Boloto, Urzhatka and Yurtochnaya Gora historical districts

К категории А относятся деревянные здания, которые после расселения были «законсервированы» – в них были проведены мероприятия, предотвращающие доступ в здания (оконные и дверные проемы закрыты металлическими или деревянными щитами и др.) и способствующие их сохранению до начала ремонтно-реставрационных работ.

К категории Б относятся деревянные здания, которые после расселения были частично «законсервированы» – в них были частично проведены мероприятия, предотвращающие доступ в здание (оконные и дверные проемы закрыты металлическими или деревянными щитами и др.) и способствующие сохранению до начала ремонтно-реставрационных работ.

К категории В относятся деревянные здания, которые *после расселения не были «законсервированы»* – в них не были проведены мероприятия, предотвращающие доступ в здание и способствующие его сохранению до начала ремонтно-реставрационных работ.

К категории Г относятся деревянные здания, *частично расселенные и частично используемые под жилую или общественную функцию*.

К категории Д относятся деревянные здания, которые *были расселены для выполнения ремонтно-реставрационных работ*, которые ведутся в настоящее время, а также *воссоздаваемые здания*.

К категории Е относятся деревянные здания, которые в настоящее время *утрачены, несмотря на то, что часть из них была «законсервирована»* – доступ в здания был предотвращен (оконные и дверные проемы закрыты металлическими или деревянными щитами и др.).

К категории Ж относятся деревянные здания, которые в настоящее время находятся *в руинированном состоянии*.

Результаты исследований отражены в таблицах с информацией по выявленным объектам деревянной архитектуры и на планировочной схеме исторических кварталов центральной части г. Томска (рис. 4).

КАТЕГОРИИ НЕЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ ДЕРЕВЯННОЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ В ТОМСКЕ								
№ п/п	Фото главного фасада	Исторический район	Функция	КАТЕГОРИЯ А (законсервированные)			Примечание	
				Адрес Статус	Форма собственности	Степень сохранности архитектурно-художественного облика		
1	2	3	4	5	6	7	8	
1		- ПЕСКИ - Ул. Карла Маркса, 41 - Нет	Жилая Отсутствует	- (кастстр. карта)	Нарушенный: - изменились первоначальные пропорции здания, скрыт кирпичный цоколь из-за роста культурного слоя - утрачены: кровля, система крыши, печные трубы, водосточные трубы, частично наличники и декоративные элементы - отсутствует окрас декоративных элементов	Аварийное: - возможно нарушение и биопоражение кирпичного цоколя - осадка фундамента - с северного и восточного фасадов наблюдается выпучивание и выпадение бревен - зоны намокания всего здания - у всех стен здания наблюдается отклонение по горизонтали и вертикали - отмостка отсутствует	C 1888 года усадьба принадлежала А. Ю. Миллер фон-Эренштунг. С 1895 года принадлежала М. А. Ларине, а с 1917 года – П. Ф. Потапову. Состав усадьбы: данное здание и ул. К. Маркса, 39. <ul style="list-style-type: none">• Данные реестра:- Кадастровый номер ЗУ: 70:21:0100056:1773.- Разрешенное использование ЗУ: для эксплуатации многоквартирного дома.• Считается аварийным с 15.10.2015• Расселен с (примерно) 2016 г.	

Рис. 4. Фрагмент таблицы с информацией по выявленным объектам деревянной архитектуры
Fig. 4. A table fragment with information about the identified sites of wooden architecture

По результатам натурного обследования *всего выявлено 173 деревянных здания*. Распределение объектов по районам следующее: Заозерье – **20**; Пески – **22**; Воскресенская гора – **20**; Кирпичи – **4**; Болото – **9**; Уржатка – **15**; Юрточная гора – **35**; Заисточье – **23**; Елань – **25**. Из общего числа выявленных объектов лишь **19** являются *объектами культурного наследия*. Остальные здания относятся к *ценной и рядовой историко-архитектурной среде*, значимость которой трудно переоценить, т. к. именно эта застройка формирует **архитектурно-художественное своеобразие** старинного сибирского города.

На основании нижеприведенного сравнительного анализа количественного состава деревянной застройки второй половины XIX – начала XX в., сохранившейся в историческом центре г. Томска на период сентябрь – декабрь 2020 г. (данные на указанный период представлены в дипломной работе А.А. Бычковой «Деревянная застройка второй половины XIX – середины XX века, сохранившаяся в историческом центре г. Томска», выполненной в 2021 г. под руководством Л.С. Романовой на кафедре реставрации и реконструкции архитектурного наследия (РиРАН) Томского государственного архитектурно-строительного университета) и сентябрь – декабрь 2023 г., была отмечена тенденция к сокращению количества деревянной застройки, которая представляет ценность не только для города Томска, но и является, по мнению специалистов, уникальным явлением мировой культуры (таблица).

Несмотря на относительно незначительный процент утраты деревянной застройки (см. таблицу), совокупность данных о количестве неэксплуатируемой застройки, выявленных авторами, позволяет составить *реальную картину состояния деревянной архитектуры Томска – уникального явления мировой культуры, энциклопедии резьбы по дереву, исчезающей национальной архитектуры России*.

Для предотвращения окончательной утраты заброшенных, пришедших в запустение деревянных зданий **необходимо принимать неотложные меры по их сохранению**.

**Сравнительный анализ деревянной застройки второй половины XIX –
начала XX в., сохранившейся в исторических районах Томска
по состоянию на декабрь 2020, 2023 гг.**

Wooden buildings in historical districts of Tomsk in 2021 and 2023

Количество домов в 2021 г.	Количество домов в 2023 г.
Район Заозерье	
68	67
Район Пески	
90	87
Район Воскресенская гора	
168	168
Район Кирпичи	
31	31
Район Болото	
56	55
Район Уржатка	
112	112
Район Юрточная гора	
132	132
Район Заисточье	
–	–
Район Елань	
90	88

Для выявления эффективных методов по сохранению деревянной архитектуры были изучены различные проекты, выполненные для исторического центра Томска: эскизные, конкурсные и студенческие проекты развития территорий, застройки кварталов и нового строительства на участках, занятых в настоящее время исторической застройкой. Следует отметить, что кроме проектов, учитывающих значимость сохранения объектов культурного наследия, рядовой и фоновой деревянной застройки, существует множество концепций, основанных на строительстве современных несомасштабных с окружающей застройкой зданий в целостной исторической среде. Большое количество таких проектов наглядно демонстрирует неосведомленность проектировщиков о многогранной ценности исторического центра Томска, перспективах его развития за счет современного использования исторической застройки, в том числе деревянной, или игнорирование этих возможностей.

Яркими примерами некорректных решений являются: проект «Умная деревня» в центре Томска в рамках образовательной программы «Городские практики» 2021 г. [13], в котором авторы предлагают снос исторической и возведение современной застройки на территории, ограниченной улицами Октябрьская, Загорная и Лермонтова (рис. 5). Предлагаемые здания выполнены *не из традиционного для данной территории материала* – дерева и *несомасштабны* с исторической средой – имеют большие остекленные площади на фасадах, современный

силуэт и большую протяженность зданий. В проекте «Архитектурная концепция жилого комплекса по ул. Трифонова, 23, и административно-офисного центра по пр. Ленина, 48, в г. Томске» [14] на пересечении территорий исторических районов Заисточье и Елань предложено выполнить жилой комплекс с элементами общественных пространств, включая «водно-зеленый клин», объединяющий верхнюю и нижнюю террасы, в современном стиле с плотной застройкой. Проект выполнен без учета истории, историко-культурного наследия города, его статуса, градостроительных регламентов территории (рис. 6).



Рис. 5. Проект «Умная деревня» в центре Томска в рамках образовательной программы «Городские практики» 2021 г. Визуализация¹

Fig. 5. The Smart Village Project at the center of Tomsk in the frame of the academic programme “Urban practices”, 2021

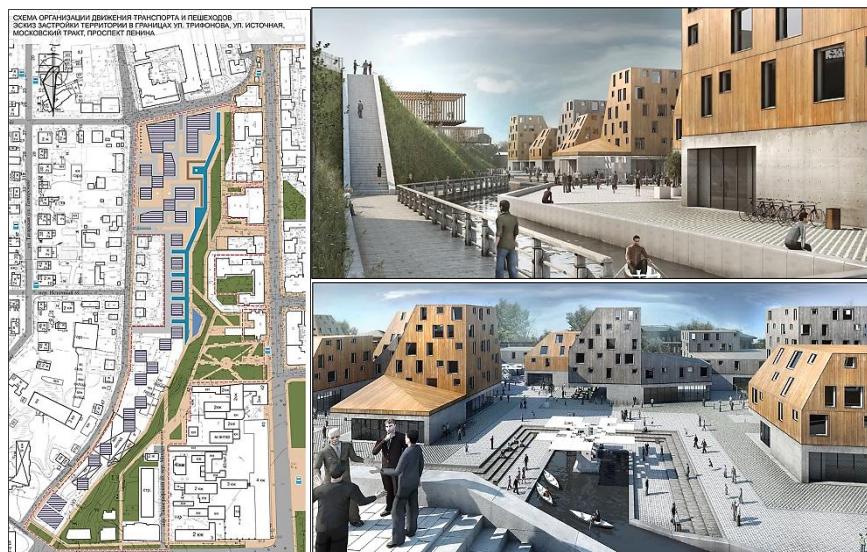


Рис. 6. Проект «Архитектурная концепция жилого комплекса по ул. Трифонова, 23, и административно-офисного центра по пр. Ленина, 48, в г. Томске»²

Fig. 6. Project “Architectural concept of residential complex in 23, Trifonov Str. and the administrative center in 48, Lenin Ave. in Tomsk”

¹ URL: <https://obzor.city/article/660067---novoe-boloto-kak-uchastniki-gorodskih-praktik-predlozhili-izmenit-istoricheskij-центр-tomска>

² URL: <https://www.apbstyle.com/ul-trifonova-23>

Значительную роль в сохранении исторической застройки, в данном случае – деревянной, играет ее функциональное использование. Этот действенный инструмент апробирован временем и успешно применяем на практике в разных странах. Неэксплуатируемые здания быстро приходят в ветхое состояние, несмотря на проведение работ по консервации. Для обеспечения долговременного сохранения предлагаемая функция должна быть научно обоснована, т. е.: необходимо учитывать первоначальную функцию здания, определившую планировку и возможные конструктивные нагрузки; ценностные характеристики, место расположения в структуре города и его функциональное зонирование; возможность подключения к инженерным сетям и реальную нагрузку; целесообразность функции и ее актуальность для современного города.

Для подбора целесообразной функции авторами статьи были изучены *исторические функции* выявленных неэксплуатируемых деревянных зданий, их текущее *техническое состояние*, а также *разрешенное использование* принадлежащих им земельных участков, указанное в публичной кадастровой карте. Для дальнейшей работы выявленные авторами деревянные здания на основе анализа были подразделены на *несколько групп*:

- неэксплуатируемые деревянные здания, у которых разрешенное использование в публичной кадастровой карте *не соответствует первоначальному назначению*;
- неэксплуатируемые деревянные здания, у которых *отсутствует предложенная функция* в публичной кадастровой карте;
- неэксплуатируемые деревянные здания, *не внесенные в реестр публичной кадастровой карты*;
- неэксплуатируемые деревянные здания, у которых разрешенное использование в публичной кадастровой карте *соответствует первоначальному назначению*.

Наиболее проблемными являются объекты, у которых либо полностью отсутствует информация о разрешенном использовании, либо она не совпадает с исторической функцией. В большинстве случаев варианты их разрешенного использования являются абсурдными и потенциально губительными для исторического здания. Для подбора научно обоснованной и актуальной функции выбранных объектов была выполнена схема функционального использования застройки, входящей в радиус доступности от неэксплуатируемых деревянных зданий, с указанием жилого и общественного использования застройки (рис. 7, 8). К схеме прилагается экспликация с подробным списком расположенных в окружающей застройке общественных функций.

К историческим районам, в которых преобладают здания с *жилой функцией*, относятся Заозерье, Воскресенская гора, Кирпичи, Болото, Уржатка, Юрточная гора и Заисточье. В районах Пески и Елань доминирует *общественная функция*. Выявлены основные виды *общественной функции*, преобладающие в настоящее время в исторических районах:

Заозерье: продуктовые магазины; рынки; детские сады;

Пески: магазины (продуктовые, одежды, обуви); салоны красоты; аптеки; медицинские учреждения (стоматология); юридические услуги;

Воскресенская гора: досуговые центры и кружки; медицинские учреждения (стоматологии); автосервисы; юридические услуги; пункты выдачи; кафе; салоны красоты; административные здания;

Кирпичи: спортивные клубы; строительные компании;

Болото: строительные компании;

Уржатка: салоны красоты; спортивные центры/клубы; кафе; административные здания; юридические услуги; пункты выдачи; образовательные учреждения (центры, кружки, школы), детские сады;

Юрточная гора: продуктовые магазины; магазины одежды; кафе; административные здания; студии массажа; салоны красоты; спортивные клубы/секции; образовательные учреждения (кружки, школы, академии); строительные компании; медицинские центры.

Заисточье: образовательные учреждения; сервисные центры; рекламные агентства;

Елань: образовательные учреждения; магазины (продуктовые, одежды, техники); кафе; кафе быстрого приготовления; рестораны; бары; кофейни; стоматологии; дополнительные образовательные курсы; общежития.



Рис. 7. Схемы функционального использования застройки, входящей в радиус доступности от неэксплуатируемых деревянных зданий в исторических районах Воскресенская гора, Уржатка, Болото, Кирпичи, Юрточная гора

Fig. 7. Maps of building functional use in the radius of accessibility from unused wooden buildings in Voskresenskaya Gora, Urzhatka, Boloto, Kirpichi, Yurtochnaya Gora historical districts

Таким образом, можно сделать вывод, что общественная функция в обследуемых районах многообразна и ее необходимо учитывать при назначении функционального использования для неэксплуатируемой деревянной застройки. Такой подход позволит привлечь инвесторов под конкретную функцию, востребованную на конкретной территории.

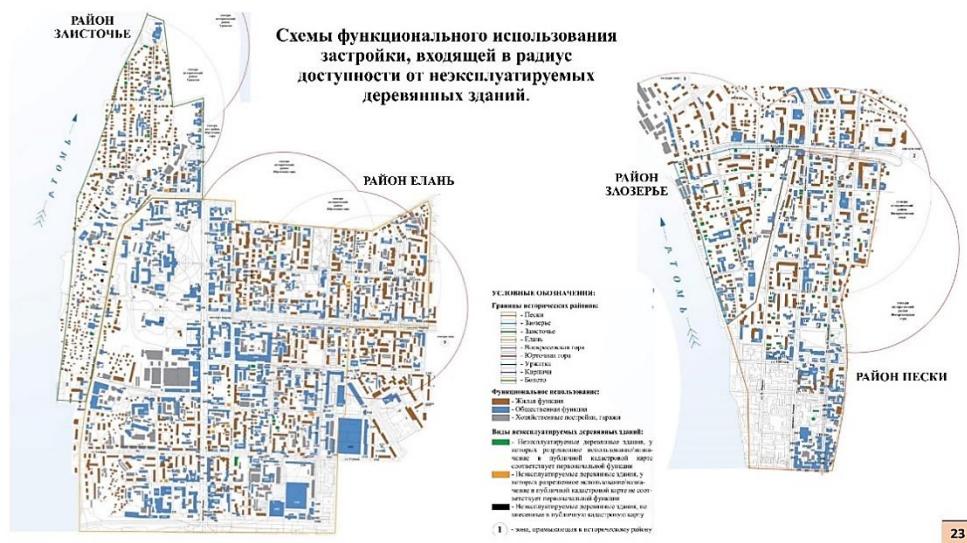


Рис. 8. Схемы функционального использования застройки, входящей в радиус доступности от неэксплуатируемых деревянных зданий в исторических районах Заозерье, Заисточье, Елань, Пески

Fig. 8. Maps of building functional use in the radius of accessibility from unused wooden buildings in Zaozerye, Zaistochye, Elan, Peski historical districts

Информация, полученная в результате исследования, имеет определяющее значение для сохранения деревянной архитектуры Томска и будет способствовать принятию необходимых и научно обоснованных мер по сохранению выявленной неэксплуатируемой деревянной застройки в исторических районах г. Томска со стороны администрации города и районов, а также органов охраны памятников истории и культуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Залесов В.Г., Кулакова И.В. Архитектура деревянных доходных домов Томска (конец XIX – начало XX в.). Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. 420 с.
2. Нагорнов Ю.П. Город. Томская панорама начала XX века. Томск : Курсив, 2004. 212 с.
3. Романова Л.С. Здесь начинался Томск. Прошлое, настоящее, будущее. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2004. 217 с.
4. Старикова Г.Н. История названий Томских улиц / отв. ред. Г.Н. Старикова. 3-е изд., доп. Томск : Д-Принт, 2012. 368 с.
5. Гармаш Ю.М. Деревянное зодчество Томска. Проблемы сохранения неповторимого «томского стиля» // Проблемы сохранения архитектурного и историко-культурного наследия : материалы III региональной общественной конференции, 24 ноября 2012 г. / Томский областной художественный музей ; Томское региональное отделение Международного общества организации «Лига защиты культуры» ; редкол.: Н.П. Боровинских [и др.]. Томск : Красное знамя, 2013. 133 с.
6. Ситникова Е.В. Проблемы сохранения исторической застройки в современном городе (на примере г. Томска) // Реконструкция и реставрация архитектурного наследия : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 20–23 марта 2019 г. / под ред. С.В. Семенцова [и др.]. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 138–143.

7. Ситникова Е.В. Деревянная архитектура Томска второй половины XIX – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 1 (30). С. 59–65.
8. Романова Л.С., Малевич С.С. Адаптация исторической застройки к современным условиям. Из опыта томской реставрационной школы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (41). С. 115–126.
9. Романова Л.С., Малевич С.С. Градостроительный аспект сохранения деревянной застройки Томска II половины XIX – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6 (65). С. 29–40.
10. Юдина Н.В. Пути и источники сохранения ансамблей деревянного зодчества. Опыт городов Финляндии // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 02–06 апреля 2018 г. Москва : Московский архитектурный институт (государственная академия), 2018. С. 307–310.
11. Лисовская Н.А. Сохранение групповых зон деревянного зодчества через комплексное развитие территории исторического поселения (на примере города Томска) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 2. С. 22–37. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-22-37
12. Ягутьева Д.А. Сибирский опыт использования деревянных памятников архитектуры в индустрии гостеприимства // Город, пригодный для жизни : материалы V Международной научно-практической конференции, Красноярск, 10–11 ноября 2022 г. / отв. за выпуск Д.Е. Лемытская. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. С. 594–599.
13. Проект «Умная деревня» в центре Томска в рамках образовательной программы «Городские практики» 2021 г. URL: <https://obzor.city/article/660067--novoe-boloto-kak-uchastniki-gorodskikh-praktik-predlozhili-izmenit-istoricheskij-centr-tomska> (дата обращения: 12.04.2025).
14. Проект «Архитектурная концепция жилого комплекса по ул. Трифонова, 23, и административно-офисного центра по пр. Ленина, 48, в г. Томске». URL: <https://www.ap-bstyle.com/ul-trifonova-23> (дата обращения: 12.04.2025).

REFERENCES

1. Zalesov V.G., Kulikova I.V. Architecture of Wooden Buildings in Tomsk Late in the 19th and Early 20th Centuries. Tomsk: TSUAB, 2016. 420 p. (In Russian)
2. Nagornov Yu.P. The City. Tomsk Panorama in the Early 20th Century. Tomsk: Kursiv, 2004, 212 p. (In Russian)
3. Romanova L.S. Tomsk Began Here. Past, Present, Future. Tomsk: TSUAB, 2004. 217 p. (In Russian)
4. Starikova G.N. (Ed.) The History of Tomsk Street Names. 3rd edn. Tomsk: D-Print, 2012. 368 p.
5. Garmash Yu.M. Wooden architecture of Tomsk. Problems of preserving the unique Tomsk style. In: Proc. 3rd Regional Conf. 'Problems of Preserving Architectural and Historical and Cultural Heritage'. November 24, 2012. Tomsk. (In Russian)
6. Sitnikova E.V. Preservation of historical buildings in modern city (the Tomsk case study). In: Proc. Int. Sci. Conf. 'Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage'. Saint-Petersburg, March 20–23, 2019. S.V. Sementsov, Ed. 2020. Pp. 138–143. (In Russian)
7. Sitnikova E.V. Wooden Architecture of Tomsk Late in the 19th and Early 20th Centuries. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011; 1 (30): 59–65. (In Russian)
8. Romanova L.S., Malevich S.S. Adaptation of Historical Buildings to Modern Conditions. Experience of Tomsk Restoration School. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; 4 (41): 115–126. (In Russian)
9. Romanova L.S., Malevich S.S. Town-Planning Aspect of Wooden Architecture Conservation in Tomsk Late in the 19th and Early 20th Centuries. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; 6 (65): 29–40. (In Russian)
10. Yudina N.V. Ways and sources of preserving wooden architecture ensembles. Cities of Finland. In: Proc. Int. Sci. Conf. 'Science, Education, and Experimental Design'. April 02–06. Moscow, 2018. Pp. 307–310. (In Russian)

11. *Lisovskaya N.A.* Preservation of Wooden Architecture Zones Through Integrated Territory Development of Historical Settlement (the Tomsk Case Study). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (2): 22–37. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-22-37 (In Russian)
12. *Yagutyeva D.A.* Siberian experience in using wooden architectural monuments in the hospitality industry. In: *Proc. 5th Int. Sci. Conf. 'A City Fit for Living'*. November 10–11, 2022. D.E. Lemitskaya, Ed. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023. Pp. 594–599. (In Russian)
13. The Smart Village Project at the center of Tomsk in the frame of the academic programme “Urban practices”. Available: <https://obzor.city/article/660067---novoe-boloto-kak-uchastniki-gorodskih-praktik-predlozhili-izmenit-istoricheskij-центр-tomska> (accessed April 12, 2025). (In Russian)
14. Project “Architectural concept of residential complex in 23, Trifonov Str. and the administrative center in 48, Lenin Ave. in Tomsk” Available: www.apbstyle.com/ul-trifonova-23 (accessed April 12, 2025). (In Russian)

Сведения об авторах

Романова Лариса Степановна, канд. архитектуры, доцент, советник РААС, зав. кафедрой, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lara235@yandex.ru

Касимова Александра Владимировна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kasimova.sandra@mail.ru

Коптева Елизавета Михайловна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lisakopteva@mail.ru

Authors Details

Larisa S. Romanova, PhD, A/Professor, Advisor of RAAS, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lara235@yandex.ru

Aleksandra V. Kasimova, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kasimova.sandra@mail.ru

Elizaveta M. Kopteva, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lisakopteva@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 30.07.2025
Одобрена после рецензирования 03.09.2025
Принята к публикации 10.09.2025

Submitted for publication 30.07.2025
Approved after review 03.09.2025
Accepted for publication 10.09.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 22–34.

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 (6): 22–34.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721.011

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-22-34

EDN: AGXXHW

КОНЦЕПЦИЯ СОВРЕМЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА С СОХРАНЕНИЕМ АРХИТЕКТУРНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ ГОРОДА АРХАНГЕЛЬСКА

Александра Федоровна Еремеева, Анастасия Юрьевна Бусуёк,
Илья Валерьевич Резайкин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена риском потери идентичности архитектурной среды Архангельска в результате преобразований застройки исторического центра в XX в.

Цель исследования заключается в разработке системного подхода к проектированию новых зданий с учетом исторического контекста и архитектурной идентичности Архангельска на примере концепции современной застройки территории бывшего рабочего поселка Лесозавода № 3.

Методы. В работе применен архитектурно-градостроительный анализ исторической и современной застроек Архангельска. Акцент в исследовании сделан на особенностях исторической деревянной архитектуры как наиболее характерной и уникальной для города. Апробация современных архитектурных решений жилой застройки с учетом архитектурной идентичности проведена в результате разработки проекта развития территории рабочего поселка Лесозавода № 3 в юго-восточной части города на берегу Северной Двины, имеющей сохранившуюся цельную среду с деревянной архитектурой советского периода.

Результаты. При формировании концепции развития застройки поселка Лесозавода № 3 сформулированы принципы современного строительства с сохранением архитектурной идентичности Архангельска: принцип сохранения модуля, принцип современной интерпретации, принцип климатического комфорта.

Ключевые слова: архитектура, деревянная архитектура, исторический центр, идентификация, архитектурная среда, перспективное развитие, Архангельск, Русский Север

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ на 2025 год.

Для цитирования: Еремеева А.Ф., Бусуёк А.Ю., Резайкин И.В. Концепция современного строительства с сохранением архитектурной идентичности города Архангельска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 22–34. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-22-34. EDN: AGXXHW

ORIGINAL ARTICLE

**MODERN CONSTRUCTION CONCEPT OF PRESERVATION
OF ARCHITECTURAL IDENTITY IN ARKHANGELSK****Aleksandra F. Eremeeva, Anastasiya Yu. Busuek, Il'ya V. Rezaikin***Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. The research relevance is due to the risk of losing the architectural identity of Arkhangelsk as a result of transformations of the historical center in the 20th century.

Purpose: The purpose is to develop a systematic approach to the design of new buildings, taking into account the historical context and architectural identity of Arkhangelsk based on the modern construction concept of the former Timber Mill No. 3 work settlement.

Methodology: The architectural and urban planning analysis of historical and modern buildings in Arkhangelsk.

Research findings: The historical wooden architecture is considered as the most characteristic and unique for the city. The approbation of modern architectural solutions for residential development, taking into account architectural identity, is carried out as a result of the project development of the territory of the Timber Factory No. 3, locating in the southeastern part of the city on the banks of the Northern Dvina River and having preserved an integral environment with wooden architecture of the Soviet period.

Value: The settlement development allowed formulating principles of modern construction of the former work settlement of the Timber Mill No. 3, while preserving the architectural identity of Arkhangelsk: module preservation, modern interpretation, comfortable climatic conditions.

Keywords: architecture, wooden architecture, historical center, identification, architectural environment, promising development, Arkhangelsk, Russian North

Funding: this work was financially supported by Grant No. 14C25 from the Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

For citation: Eremeeva A.F., Busuek A.Yu., Rezaikin I.V. Modern Construction Concept of Preservation of Architectural Identity in Arkhangelsk. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 22–34. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-22-34. EDN: AGXXHW

Введение

Архангельск – один из крупнейших городов Русского Севера, имеющих богатую историю. Первые промысловые поселения на этом месте были основаны коренными жителями земель. Коми, ненцы, корелы, лопари издревле занимались здесь добычей меха и рыбы. В условиях необходимости обороны северных земель в 1584 г. по указу Ивана Грозного началось строительство крепости в устье Северной Двины на возвышении мыса Пур-Наволок. Этот год считается датой основания Архангельска [1].

В начале XX в. Архангельск имел величественный силуэт со стороны набережной реки: над низкой жилой застройкой возвышались многочисленные храмы. Однако в течение века облик Архангельска существенно изменился, в результате чего был утрачен силуэт города и большая часть исторической застройки. Первый этап преобразований начался в 1929 г. в результате деятельно-

сти отделения Союза воинствующих безбожников. Для строительства драматического театра был разобран Троицкий кафедральный собор (1709–1743), за сносом которого последовало уничтожение других культовых построек. Для возведения новых административных зданий в центре города расчищались площадки. Деятельность велась местными конторами без генерального плана, о чем упоминается в исследованиях Н.Г. Благовидовой и В.Д. Акишевой [2], Л.Д. Поповой [3].

Разрушение застройки центра Архангельска продолжилось в 1960-е гг., когда последовал массовый снос аварийной деревянной застройки и возведение новых жилых зданий по типовым проектам. Новой доминантой города и самым высоким сооружением Архангельской области (82 м до уровня кровли, 100 м до верха антенны) стало Здание проектных организаций, построенное в 1980-х гг. в стиле советского модернизма. Ранее на этом месте располагался купеческий особняк.

В наше время проблема застройки Архангельска современными зданиями продолжается, что требует проведения исследования. Город активно застраивается многоэтажными зданиями, которые не учитывают масштаб, материалы и другие особенности оставшихся исторических построек. Примерами являются бизнес-центр «Гулливер» на ул. А.О. Шабалина, который не сомасштабен окружающей деревянной застройке, или жилой комплекс «Империал» на ул. Воскресенской, который наряду со Зданием проектных организаций является доминантой города. В результате в обозримом будущем город рискует окончательно утратить свою архитектурную идентичность, сохранение которой является важным аспектом развития Архангельска. О важности сохранения идентичности исторического города в условиях глобализации в трудах Г.В. Есаулова [4], Л.П. Лаврова [5].

Цель исследования заключается в разработке системного подхода к проектированию новых зданий с учетом исторического контекста и архитектурной идентичности Архангельска на примере концепции современной застройки территории бывшего рабочего поселка Лесозавода № 3.

Для осуществления данной цели необходимо последовательное решение следующих задач:

- провести исторический анализ формирования застройки территории рабочего поселка Лесозавода № 3 с учетом общей периодизации застройки Архангельска;
- выявить особенности архитектурной идентичности застройки территории рабочего поселка Лесозавода № 3;
- разработать принципы формирования новой застройки с учетом сохранения архитектурной идентичности для современной застройки территории бывшего рабочего поселка Лесозавода № 3.

Методы исследования

В исследовании применен архитектурно-градостроительный анализ исторической и современной застроек Архангельска:

- историко-культурный анализ этапов развития и трансформации застройки исторического центра города за счет наложения исторических карт различных периодов развития города;

– натурное и картографическое исследование застройки территории рабочего поселка Лесозавода № 3 и ее идентификационных особенностей путем анализа сохранившихся построек и данных из архивных документов.

Апробация современных архитектурных решений жилой застройки с учетом архитектурной идентичности проведена в результате разработки проекта развития территории рабочего поселка Лесозавода № 3. Этому предшествовали градостроительный анализ планировки поселка, архитектурный анализ типов жилых зданий, расположенных на территории, поиск идентификационных характеристик исторических зданий. Проект иллюстрирует принципы формирования новой застройки с учетом сохранения архитектурной идентичности. Данная методология формирования современной застройки может быть применима в других частях Архангельска.

Архитектурная идентичность Архангельска

История развития застройки Архангельска тесно связана с деревянным строительством. Обилие лесов в регионе определило применение дерева как основного строительного материала для гражданской архитектуры города вплоть до начала XX в. [6, 7] Дерево здесь стало не просто строительным материалом, а языком выразительности, что воплощалось в крестьянских избах и резных фасадах купеческих домов. Деревянная застройка Архангельска подчеркивает уникальность и неповторимость архитектурной среды города, ныне во многом утраченной (рис. 1).



Rис. 1. Особенности деревянной архитектуры Архангельска
Fig. 1. Identification of wooden architecture in Arkhangelsk

В результате исследования выявлено несколько исторических этапов развития застройки Архангельска, каждый из которых так или иначе связан с деревянной архитектурой – ее зарождением, развитием, сносом, осознанием ценности, сохранением и изучением.

1. XVI–XVII вв. Основание Архангельска, начало развития города как центра внешней торговли и форпоста Севера России. Гостиный двор – крупное торговое и оборонительное сооружение города, первое каменное здание в Архангельске. Основной массив застройки деревянный.

2. XVIII в. – первая половина XIX в. Развитие регулярной планировки Архангельска вдоль берега реки: проложено четыре проспекта, параллельных Северной Двине. Формирование плотной деревянной застройки: в центре Архангельска располагались купеческие особняки и административные здания, ближе к окраинам – рабочие слободы.

3. Вторая половина XIX – начало XX в. До революции 1917 г. Архангельск в основном застраивался 1–2-этажными деревянными домами, на первых этажах которых размещались ремесленные мастерские. Особняки выделялись характерными угловыми эркерами и богатой резьбой, украшавшей наличники окон и карнизы. В их облике воплощались традиции Русского Севера. Особенность акцентировать углы зданий эркерами перешла впоследствии и на каменную архитектуру Архангельска.

4. 1920–1930-е гг. Снос культовых сооружений. Строительство на их месте административных зданий и культурных учреждений нового типа. Проектирование и строительство типовых жилых зданий из дерева. Деревянный двухсекционный брускатый жилой дом в основном применялся при застройке рабочих поселков на окраинах города [8]. Такая застройка сохранилась на территории бывшего рабочего поселка Лесозавода № 3.

5. 1960–1980-е гг. Снос ветхой деревянной застройки. Строительство типовых панельных жилых зданий. Строительство уникальных объектов в стиле советского модернизма (Здание проектных организаций – новая городская доминанта).

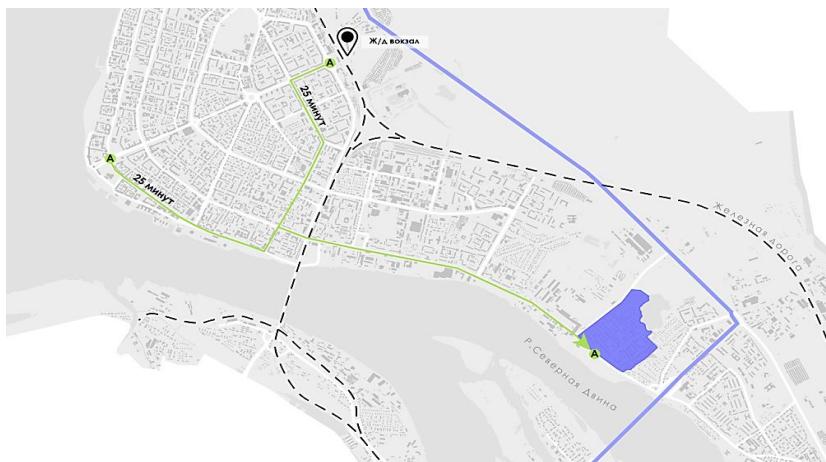
6. 1990-е гг. до настоящего времени. Строительство современных зданий (жилых комплексов, бизнес-центров) по индивидуальным проектам без учета контекста места. Формирование «заповедной улицы» – проспекта Чумбарова-Лучинского, на котором размещены все типы построек Архангельска конца XIX – начала XX в. Часть из них расположена на своих исторических местах, часть перенесена с других улиц города, часть полностью воссоздана.

В Архангельске практически не сохранилось цельных фрагментов городской среды с подлинной деревянной застройкой [9]. Проспект Чумбарова-Лучинского – это «музейная» улица, искусственно созданная и направленная в первую очередь на посещение туристами. Деревянная застройка раннего советского периода существует на территории рабочего поселка Лесозавода № 3 и представляет интерес для более подробного исследования.

Особенности застройки рабочего поселка Лесозавода № 3

Территория поселка Лесозавода № 3 (первоначально Лесозавод Суркова и Шергольда) расположена в юго-восточной части Архангельска на берегу Северной Двины (рис. 2). История поселка связана с Лесозаводом № 3, который в конце XIX – начале XX в. был одним из крупнейших лесопильных комплексов на Северо-Западе России.

Завод был основан в 1881 г. архангельскими купцами Альбертом Сурковым и Егором Шергольдом и начинался с однорамной лесопилки. Затем он постепенно рос и развивался, сформировавшись как отдельное лесопильное предприятие в 1904 г. в составе «Северного лесопромышленного товарищества. Сурков и Шергольд». После революции 1917 г. завод был национализирован, впоследствии стал центром лесной промышленности Архангельска в период индустриализации.



Rис. 2. Расположение рабочего поселка Лесозавод № 3
Fig. 2. Location of the Lesozavod No. 3 work settlement in Arkhangelsk

С 1972 по 1997 г. Лесозаводом № 3 руководил Альберт Сасс, который за 25 лет руководства сделал его одним из главных предприятий лесной отрасли не только в городе, но и в регионе. При заводе был создан собственный жилой фонд в 102 дома со всей инфраструктурой, необходимой для комфортной жизни работников и их семей, а именно: детские сады, школа, дом культуры, библиотека, медицинские учреждения [10]. Поселок был самодостаточным и почти не зависел от города.

В 1990-е гг. Лесозавод № 3 находился в кризисном состоянии, вследствие ухода от плановой экономики, пока окончательно пришел в упадок в 2016 г. С 2020 г. на территории располагается пеллетное производство. Жилой фонд завода, детские сады и другая социальная инфраструктура были переданы в управление городу.

На участке сохранилась цельная среда с деревянной застройкой, что утрачено в центре города и делает территорию интересной для исследования.

По рис. 3 можно проследить, как развивалась территория. На фотографии, которая была сделана со спутника в 1967 г., видна жесткая градостроительная структура – четко выстроенные фронты улиц, использование единого типа и модуля домов, прямоугольная схема улично-дорожной сети.



Рис. 3. Развитие застройки рабочего поселка Лесозавод № 3
Fig. 3. Development of Lesozavod No. 3 work settlement

Застройку участка можно разделить на несколько периодов (рис. 4):

1. Многоквартирная деревянная застройка 1930–60-х гг.: двухсекционные и односекционные брускатые жилые дома с обшивкой и без нее. Такие дома имели два этажа, были выкрашены в разные цвета, украшены узорами из тонких дощечек с геометрическими и природными мотивами, что придавало району особый колорит (рис. 5, 6).

2. Панельная 5–9-этажная застройка периода 1970–80-х гг. на юго-востоке участка, которая своим внешним видом и масштабом очень выделяется из общего вида района.

3. Отдельные здания, появившиеся в 1990–2000-х гг.: жилой дом и центр лечебной физкультуры и спортивной медицины.

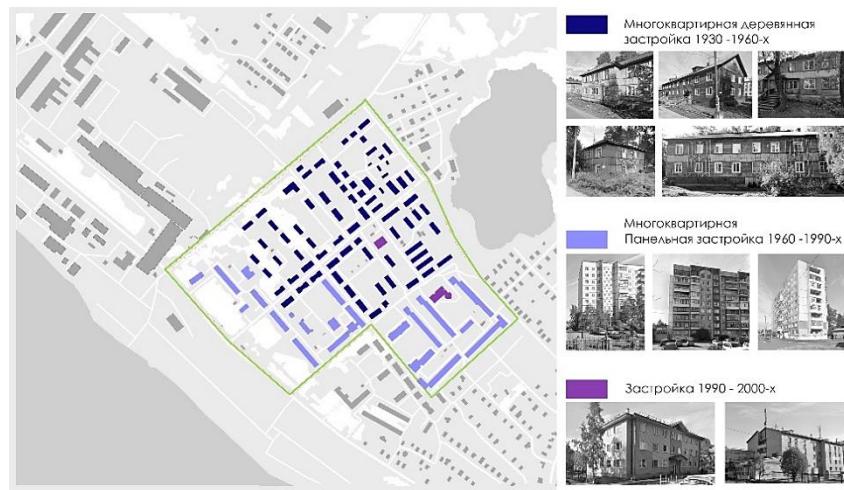


Рис. 4. Периодизация застройки рабочего поселка Лесозавод № 3
Fig. 4. Periods of construction of Lesozavod No. 3 work settlement 3

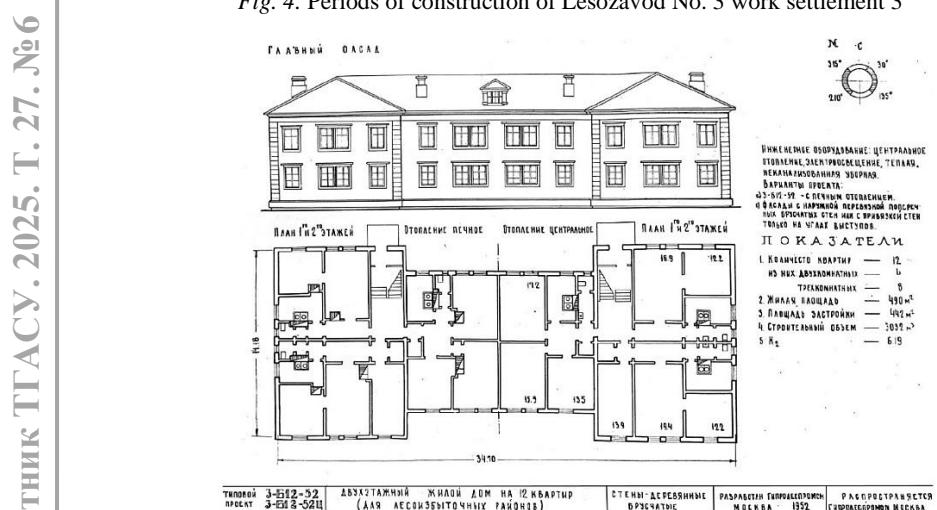


Рис. 5. Типовой жилой дом на ул. Чкалова
Fig. 5. Typical apartment building on Chkalov Street

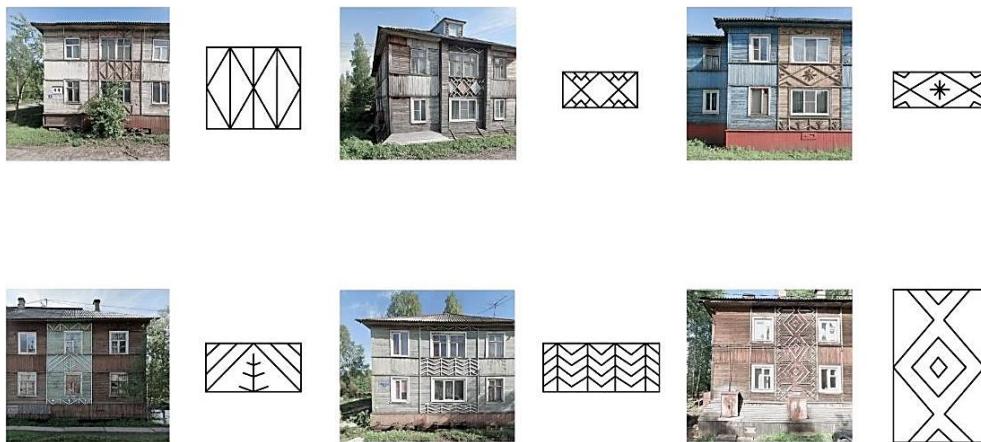


Рис. 6. Художественное оформление жилых домов на ул. Чкалова
Fig. 6. Decoration of residential buildings in Chkalov Street

Участок окружает индивидуальная жилая застройка советского и современного периодов.

Территория на данный момент является труднодоступной относительно центральной части города. Основную транспортную связь обеспечивает Ленинградский проспект, расположенный параллельно реке. От Северной Двины территорию отделяет магистраль – Ленинградский проспект, а прибрежная зона используется заводом для хранения леса, что осложняет создание связности участка с берегом реки. Непосредственно к выбранному участку прилегает оз. Бутыгино, которое является одной из основных точек притяжения для людей, проживающих в этом районе.

В настоящее время поселок находится в состоянии упадка: дома стояли на деревянных свайных основаниях, которые стянули, из-за этого деформировались стены зданий. Многие дома были снесены, некоторые находятся в разрушенном, непригодном для жизни состоянии. Все это нарушает целостность застройки, негативно влияет на общий облик района, делает его малопривлекательным и некомфортным для жизни.

Сегодня одной из задач при дальнейшем развитии данной территории является сохранение исторического облика района, своеобразия его колорита с созданием индивидуального художественного облика современной застройки, который бы делал район узнаваемым и привлекательным для людей.

Направления развития территории рабочего поселка Лесозавода № 3

В результате пространственно-планировочного анализа были выявлены следующие направления архитектурно-градостроительного развития бывшей территории рабочего поселка Лесозавода № 3:

- развитие включенности района в городскую транспортную сеть путем создания дополнительных транспортных связей;
- модернизация жилого района, адаптация его под современные условия жизни населения [11, 12];

- реставрация значимых деревянных домов, придающих району свою уникальность и идентичность за счет создания ансамбля ул. Чкалова, отсылающей к историческому прошлому территории;
- формирование современной застройки, переходящей по масштабу от 2-этажных деревянных зданий к 5–9-этажным зданиям советского периода;
- увеличение разнообразия типов жилых домов (1–2-секционные дома, многосекционные дома, таунхаусы);
- создание рекреационной зоны вдоль озера;
- обеспечение связи жилых домов с прибрежной зоной.

В процессе разработки была структурирована сетка дорог, что позволило выявить основные направления, вдоль которых будет развиваться новая застройка. Так как участок имеет ценные деревянные дома, в качестве главной улицы была выделена ул. Чкалова, которая соединяет Ленинградский проспект и озеро. Отмечено, что на ул. Чкалова четко сформирован фронт застройки и дома по большей части сохранены, поэтому принято решение реконструировать улицу, сохранив исторические здания (рис. 7).

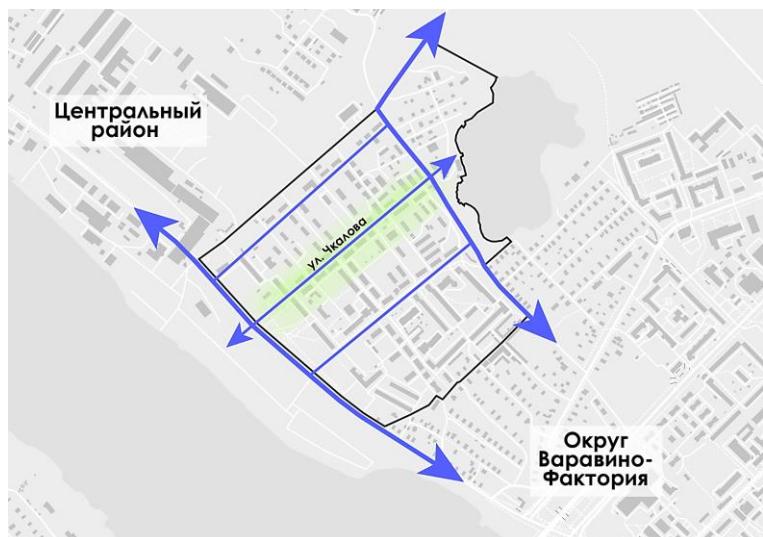


Рис. 7. Предложение по развитию улично-дорожной сети рабочего поселка Лесозавода № 3

Fig. 7. Proposed development of the street grid of in Lesozavod No. 3 work settlement

Проект предполагает гармоничное развитие территории с учетом исторического контекста и современных требований к формированию среды. Жилой массив наполнен различными типами жилья, такими как таунхаусы, секционные жилые дома и 2-этажные жилые секции, которые основаны на типологии местных домов и отсылают нас к ним, но с учетом современных требований к качеству жизни. Сформированы закрытые дворовые пространства, которые создают приватность территории для жильцов. Кварталы сочетают в себе несколько типов жилья, чтобы создать смешанную среду, которая предотвращает социальное расслоение местных жителей (рис. 8, 9).

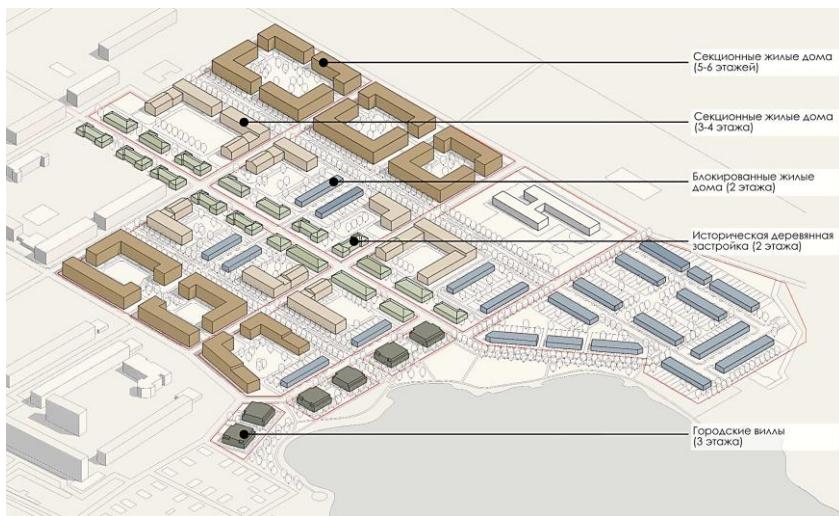


Рис. 8. Аксонометрия разрабатываемой территории
Fig. 8. Axonometric projection of the developed area



Рис. 9. Проект жилых домов в структуре рабочего поселка Лесозавода № 3
Fig. 9. The project of residential buildings in Lesozavod No. 3 work settlement

Архитектурное решение зданий сформировано исходя из истории участка. Поскольку территория Лесозавода № 3 и Архангельск в целом тесно связаны с деревянным строительством, было принято решение использовать данный материал для отделки фасадов в сочетании с бетоном при формировании фасада первых этажей, а также применить металлический профлист в качестве материала кровли и некоторых стеновых ограждений.

Заключение

В ходе проведенного исследования была выявлена необходимость сохранения архитектурной идентичности Архангельска как важнейшего элемента

устойчивого развития городской среды. Отсутствие визуального кода и системного подхода к проектированию новых объектов негативно влияет на восприятие города, снижает его культурную ценность и уникальность.

Исследование проведено на примере внедрения новых жилых зданий в застройку рабочего поселка Лесозавода № 3, где, в отличие от центра города, сохранилась цельная среда с деревянной застройкой, которая относится к раннему советскому периоду. В ходе исследования выявлены принципы современного строительства, сохраняющие архитектурную идентичность Архангельска и формирующие современную комфортную среду.

1. Принцип сохранения модуля. Сохранение градостроительного модуля застройки; сохранение пропорций сетки окон по фасаду; высотность застройки постепенно увеличивается относительно исторической застройки.

2. Принцип современной интерпретации. Современная архитектура, интерпретирующая традиционные элементы деревянной архитектуры места проектирования (оформление углов зданий, декоративные панели фасадов, обрамление окон). Использование природных материалов в строительстве и отделке, таких как дерево, камень, что обусловлено богатством этих ресурсов в регионе.

3. Принцип климатического комфорта. Организация внутренних дворов с учетом климатических особенностей региона. Ориентация застройки с учетом доминирующего направления ветра зимой.

Данные принципы позволяют создавать на рассматриваемой территории качественную современную архитектуру с учетом идентификационных особенностей среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев А.Н., Варфоломеев А.Ю. Эволюция градостроительства Архангельска и Северодвинска // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные науки. 2010. № 2. С. 5–9. EDN: MURQUJ
2. Благовидова Н.В., Акишева В.Д. Сохранение культурного наследия в контексте архитектурно-планировочной идентичности Архангельска // Architecture and Modern Information Technologies. 2024. № 4 (69). С. 192–207. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-4-192-207
3. Попова Л.Д. Архангельск в прошлом и современном пространстве: сопоставительное исследование // Праксема. Проблемы визуальной семиотики. 2018. № 3 (17). С. 145–154. EDN: UZSKHO
4. Есаголов Г.В. Об идентичности в архитектуре и градостроительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 12–18. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-12-18
5. Лавров Л.П., Перов Ф.В. «Genius Loci» под слоем штукатурки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение. 2016. № 1. С. 98–120. EDN: VTIJVV
6. Барашков Ю.А. Исследование исторической деревянной застройки Архангельска: 1980-е годы // Инновации и инвестиции. 2019. № 11. С. 253–256.
7. Перов Ф.В., Мангушев Р.А., Дацок Т.А., Болотин С.А. История и перспективы развития малоэтажной деревянной застройки городов Севера России // Жилищное строительство. 2024. № 1. С. 51–57. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-51-57
8. Акишева В.Д. Типовая деревянная архитектуры Архангельска первой половины XX века // Техника. Технологии. Инженерия. 2017. № 2 (4). С. 76–79.
9. Осина Н.А., Егорова В.А., Амясова А.В., Брязгунова Н.С. Разработка критерии сохранности деревянной городской застройки // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 1 (102). С. 15–22. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-1-15-22
10. Морозов А. Утраченные бренды Архангельска. Третий лесозавод // Двина информ : [сайт]. URL: <https://www.dvinainform.ru/archive/2017/11/16/53983.html> (дата обращения: 21.03.2025).

11. Винницкий М.В., Меренков А.В. Актуализация принципов формирования архитектурной среды Крайнего Севера и Арктики // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2024. № 3 (62). С. 52–58. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.62.3.009
12. Еремеева А.Ф., Кравчук С.Г. Перспективы развития арктического города: дискуссия в Салехарде // Техническая эстетика и дизайн-исследования. 2023. Т. 5. № 1. С. 5–8.

REFERENCES

1. Belyaev A.N., Varfolomeev A.Yu. Evolution of Urban Planning in Arkhangelsk and Severodvinsk. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Nauki o zemle*. 2010; 2: 5–9. (In Russian)
2. Blagovidova N.V., Akisheva V.D. Preservation of Cultural Heritage in the Context of Architectural and Planning Identity of Arkhangelsk. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2024; 4 (69): 192–207. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-4-192-207 (In Russian)
3. Popova L.D. Arkhangelsk in the Past and Modern Space: A Comparative Study. *Praksema. Problemy vizual'noj semiotiki*. 2018; 3 (17): 145–154. (In Russian)
4. Esaulov G.V. On Identity in Architecture and Urban Planning. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2018; 4: 12–18. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-4-12-18 (In Russian)
5. Lavrov L.P., Perov F.V. "Genius Loci" under Plaster Layer. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Iskusstvovedenie*. 2016; (1): 98–120. (In Russian)
6. Barashkov Yu.A. Investigation of Historical Wooden Buildings in Arkhangelsk: The 1980s. *Innovacii i investicii*. 2019; 11: 253–256. (In Russian)
7. Perov F.V., Mangushev R.A., Datsyuk T.A., Bolotin S.A. History and Prospects of Development of Low-Rise Wooden Buildings in Cities of the Northern Russia. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2024; 1: 51–57. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-51-57 (In Russian)
8. Akisheva V.D. Typical Wooden Architecture of Arkhangelsk in the First Half of the 20th Century. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya*. 2017; 2 (4): 76–79. (In Russian)
9. Osina N.A., Egorova V.A., Atyasova A.V., Bryazgunova N.S. Development of Criteria for Preservation of Wooden Urban Buildings. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2024; 1 (102): 15–22. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-1-15-22 (In Russian)
10. Morozov A. Lost brands of Arkhangelsk. The third sawmill. Dvina inform: Available: www.dvinainform.ru/archive/2017/11/16/53983.html. (accessed June, 30, 2025). (In Russian)
11. Vinnitskiy M.V., Merenkov A.V. Principles of Formation of the Architectural Environment of the Far North and the Arctic. *Akademicheskiy vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2024; 3 (62): 52–58. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.62.3.009 (In Russian)
12. Eremeeva A.F., Kravchuk S.G. Development Prospects the Arctic City: A Discussion in Salekhard. *Tekhnicheskaya estetika i dizajn-issledovaniya*. 2023; 5 (1): 5–8. (In Russian)

Сведения об авторах

Еремеева Александра Федоровна, канд. архитектуры, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, arch.erezemeeva@gmail.com

Бусуёк Анастасия Юрьевна, студентка, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, anastasiabusuek@yandex.ru

Резайкин Илья Валерьевич, студент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, i_rzykin@mail.ru

Authors Details

Aleksandra F. Eremeeva, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, arch.eremeeva@gmail.com

Anastasiya Yu. Busuek, Student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, anastasiabusuek@yandex.ru

Il'ya V. Rezaikin, Student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, i_rzykin@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 09.10.2025
Одобрена после рецензирования 24.10.2025
Принята к публикации 29.10.2025

Submitted for publication 09.10.2025
Approved after review 24.10.2025
Accepted for publication 29.10.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 35–47.

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 (6): 35–47.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 712.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-35-47

EDN: CNXXLO

РОЛЬ ЖИТЕЛЕЙ В ФОРМИРОВАНИИ ГОРОДСКОГО БРЕНДА

Евгения Леонидовна Абаймова, Валерия Сергеевна Чегге
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В статье рассматривается роль визуальной идентичности в создании городского бренда и роль жителей как потребителей и производителей в этом процессе.

Актуальность. Современная урбанизация приводит к унификации городской среды, утрате ее аутентичности и разрыву связи между жителями и их малой родиной. Традиционный подход к брендингу территорий, ориентированный преимущественно на туристов, игнорирует роль местных жителей как ключевых носителей и создателей идентичности. Это снижает привязанность населения к территории, усиливает отток людей из малых городов и препятствует устойчивому развитию регионов.

Цель. Исследование направлено на анализ роли жителей в формировании городского бренда, а также обоснование необходимости их вовлечения в процессы создания визуальной идентичности территории для укрепления связи с местом и повышения качества городской среды.

Методы. В работе использован анализ зарубежного и российского опыта брендинга, включая методы социологических исследований: онлайн-опросы, фокус-группы, общественные обсуждения. Изучены кейсы внедрения брендинга, а также влияние визуальных паттернов на восприятие города жителями.

Результаты. Установлено, что проекты, учитывающие мнение жителей, повышают доволетворность городской средой, укрепляют региональную идентичность и способствуют экономическому росту. Примеры Барселоны, Стокгольма и российских городов демонстрируют, что вовлечение населения на ранних этапах разработки бренда снижает риски его отторжения. Напротив, внедрение «сверху вниз», без учета локальных особенностей, приводит к унификации среды и негативной оценке со стороны населения.

Успешный городской брендинг требует интеграции культурного наследия, мнения жителей и визуальной идентичности. Ключевые рекомендации: использование социологических методов (опросы, фокус-группы), развитие диалога между властью, проектировщиками и сообществом, а также трансляция бренда через элементы городской среды (архитектура, благоустройство). Такой подход способствует сохранению аутентичности, повышению качества жизни и снижает миграционный отток.

Ключевые слова: визуальная идентичность, городской бренд, городская среда, жители, культурное наследие, локальная идентичность

Для цитирования: Абаймова Е.Л., Чегге В.С. Роль жителей в формировании городского бренда // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 35–47. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-35-47. EDN: CNXXLO

ORIGINAL ARTICLE

THE ROLE OF RESIDENTS IN THE URBAN BRAND FORMATION

Evgeniya L. Abaimova, Valeria S. Chegge

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. The article examines the role of visual identity and the role of residents as consumers and producers in the creation of the urban brand. Modern urbanization leads to the unification of the urban environment, it loses its authenticity, residents lose contact with their homeland. The traditional approach to branding territories focuses on tourists and ignores the role of residents. Local people are the key bearers and creators of identity. This reduces the population link to the territory, increases the outflow of people from small towns and hinders a stable development of regions.

Purpose: The study aims at analyzing the role of residents in the formation of urban brands. The need for their involvement is substantiated by the processes of creating the visual identity of the territory to strengthen the connection with the place and improve the quality of the urban environment.

Methodology: The analysis of the Russian and foreign experience in branding, including online surveys, focus groups, public discussions. Branding implementation and the impact of visual patterns on the perception of the city by residents are studied.

Research findings: It is shown that projects that consider the opinion of residents increase satisfaction with the urban environment, strengthen regional identity and contribute to economic growth. The examples of Barcelona, Stockholm and Russian cities demonstrate that the population involvement at early stages of brand development reduces the risk of its rejection. On the contrary, top-down implementation, without considering local characteristics, leads to the unification of the environment and a negative assessment by the population.

Research implications: A successful urban branding requires the integration of cultural heritage, residents' voices, and visual identity. This approach helps to preserve authenticity, improve the quality of life and reduce migration outflow.

Value: Key recommendations include the use of sociological methods (surveys, focus groups), dialogue between the authorities, designers and the community, brand translation through the elements of the urban environment (architecture, landscaping).

Keywords: visual identity, urban brand, urban environment, residents, cultural heritage, local identity

For citation: Abaimova E.L., Chegge V.S. The Role of Residents in the Urban Brand Formation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 35–47. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-35-47. EDN: CNXXLO

Введение

В эпоху индустриализации городская среда постепенно теряет свою аутентичность, переставая отражать историю и культуру места. Архитектура и дизайн городской среды становятся все более унифицированными, теряя связь с местными традициями. В основе их формирования теперь лежат не культурные и исторические особенности региона, а предложения производителей товаров и услуг массового потребления. Современные проекты дизайна городской среды редко перенимают визуальные паттерны городов, не реплицируют образы местных ремесел и искусств.

Современный подход к брендингу территории – это исследование культурного наследия региона и транслирование его через визуальные паттерны, форми-

рование современной визуальной идентичности территории, не только узнаваемой и понятной извне, но и принимаемой местными жителями. Люди, воспитанные в традициях определенной национальной культуры, осваивают пространство в соответствии с принятыми именно их культурой «моделями» [1].

Создание брендов городов чаще всего нацелено на туристическую сферу, активно развивающуюся как бизнес-направление. При этом интересы местных жителей как целевой аудитории рассматриваются редко как в теоретическом, так и в практическом плане. В настоящем исследовании изучается роль жителей в создании городского брендинга, а также методы вовлечения людей в развитие городской среды. Выявлена необходимость осмысливания брендинга с точки зрения его аудитории, кому адресован бренд – туристам, общественности или местным жителям.

Методы и принципы исследования

В работе использован анализ зарубежного и российского опыта брендинга, включая методы социологических исследований: онлайн-опросы, фокус-группы, общественные обсуждения.

Вопрос создания бренда города наиболее широко освещен в зарубежной литературе. Классик маркетинга Ф. Котлер [2] рассматривает основы городского брендинга, К. Динни анализирует конкретные примеры создания бренда, как успешные, так и не очень [3], Ч. Лэндри обозначает креативность как метод эксплуатации городских ресурсов [4].

Эта тема продолжает активно изучаться, авторы предлагают различные определения бренда города, многие из которых зависят от сферы их научных интересов. Многозначность термина и перенос методологии из брендинга коммерческих продуктов и услуг создает путаницу в понимании его сути. Мало изучена тема с позиции архитектурной среды города. Среди российских авторов представляют интерес работы Д. Визгалова, с 2008 г. занимающегося теоретическим и практическим изучением маркетинга и брендинга города, опираясь в большей степени на исследования в области гуманитарной географии [5]. Исследователи рассматривают уровни и взаимосвязи элементов территориального бренда в архитектурно-градостроительной концепции [6], вводя такое понятие, как «архитектурно-градостроительный брендинг» [7].

Основные результаты

Роль визуальной идентичности в формировании городской среды

Брендинг территорий – инструмент, который способствует удержанию и привлечению жителей, посетителей и инвесторов [3].

Д. Визгалов связывает понятия маркетинга и бренда города, а также идентичности, считая, что ценность бренда города определяется не сама по себе, а лишь в той мере, в которой он помогает в маркетинге города – в продвижении интересов территории для решения конкретных задач ее развития. Образ города, который получается в ходе его брендинга, должен быть как можно более точным отражением идентичности города – представлений городского сообщества о его смысле и уникальных чертах [5, с. 12].

Успешный городской брэндинг требует учета многих факторов, включая культуру, историю, географическое положение региона и его экономическое развитие. Особую роль играет сотрудничество с заинтересованными сторонами, такими как эксперты, местные предприятия, правительство и жители. Привязанность к малой родине проявляется в степени самоидентификации жителей с конкретной территорией – устойчивом отождествлении себя с какой-либо социальной группой или общностью (гражданская и региональная идентичность), принятии ее целей и системы ценностей, осознании себя членом этой группы или общности [8, 22, 23].

Визуальная идентичность территории – это сумма явлений локальной культуры, структуры городской среды и восприятия этих явлений жителями. Она включает в себя ответы на вопросы: какие места, события и людей считают самыми важными в своем городе, какое место отводят городу на карте страны и мира, и какое место каждый из жителей отводит себе в местном культурном ландшафте [8–10]. Визуальная идентичность территории складывается из привычных для горожан фасадов и объемов зданий, распространенных декоративных элементов и образов, материалов и фактур, оттенков, стилевых особенностей объектов декоративно-прикладного искусства и ремесел. В архитектуре эклектика северных и южных регионов России имеет свои особенности. Отличия могут быть продиктованы разными историческими аспектами, мифологией региона, ландшафтом, природными ресурсами и породами дерева, а также уникальными характеристиками флоры и фауны. Эти факторы формируют облик каждого региона. Представления жителей о городе во многом зависят от окружающей действительности – характера городской среды. Также связь города и жителей проявляется через решения жителей по переустройству городской среды [5, с. 38].

Городской брэнд, основанный на визуальной идентичности территории, является мощным инструментом развития, который играет ключевую роль в формировании имиджа города, привлечении инвестиций, продвижении туризма, повышении уровня комфорта городской среды для ее жителей и чувства их принадлежности к малой родине.

Основа брэнда – идентичность города – должна быть проявлена, воплощена в городской среде и вообще в повседневной городской жизни. Д. Визгалов выделяет четыре направления (сфера) для внедрения брэнда в городскую среду: 1) городское пространство; 2) городская инфраструктура; 3) сфера управления; 4) культурная жизнь города [5, с. 71]. Идентичность города может проявляться в оригинальной архитектуре (Москва – Кремль, ГУМ, МГУ; Санкт-Петербург – Эрмитаж, Петропавловская крепость; Ростов-на-Дону – драматический театр им. Горького), в использовании природных компонентов, таких как море, река, горы, сады и парки (набережная Дона, морская набережная в Геленджике, гора Машук в Пятигорске). Также она может выражаться в развитии отдельных уникальных городских районов, зонировании территории на культурные, исторические, этнические районы, в использовании дизайна городской среды с элементами брэнда (лучшие решения можно найти в Амстердаме и Копенгагене).

При создании территориального брэнда важно учитывать уникальность места и идентичность его архитектурной среды, определяемые на основе мнения стейкхолдеров, сохранять композиционный каркас и структуру городской среды [6].

Важным этапом создания бренда города является определение целевой аудитории. Городской бренд создается для продвижения уникального места среди туристов, инвесторов и жителей через отражение идентичности городской среды. Основными потребителями бренда являются сами жители города, и их характеристика и оценка городской среды во многом зависят от корреляции брендинга с их представлениями о месте.

Однако наиболее распространенная практика формирования визуального облика городов «сверху вниз», исходя из заказа администрации, обычно приводит к созданию образов унитарных и типовых. Потребности и мнение жителей при этом обычно не учитываются. Исследователи Д.Э. Эскалас и Д.Р. Беттман в своих работах показывают, что жители являются не только создателями и потребителями городского бренда, но и играют решающую роль в его построении и узнавании [8, 19, 22, 23].

Жители города активно участвуют в процессе производства городского бренда. Они живут в создаваемой среде, вовлечены в городские проекты: в их создание, выбор путем голосования тех или иных форм благоустройства. Архитекторы, дизайнеры, проектировщики, рекламщики и владельцы бизнеса – все они производят визуальный продукт в виде архитектурных сооружений, графики, витрин, вывесок и многое другое. Если они не могут опереться на сформированные принципы и образ городской среды на основе брендинга, то результатом становится хаотичная, аляповатая и несогласованная среда, наполненная визуальным «шумом». Даже гармоничные сами по себе решения в таком контексте теряют свою ценность из-за неудачного соседства.

Принцип создания городского бренда «снизу вверх» предполагает совместное участие граждан города и местной власти. При таком подходе горожане вовлекаются на ранних этапах разработки бренда и на этапе оценки полученного результата. Взаимодействие с жителями при создании городского бренда является важным фактором, т. к.: 1) жители города являются производителями городского бренда, генерируя аутентичность города и являясь ее носителями; 2) жители – потребители городского бренда, они живут в городе и непосредственно взаимодействуют с его средой; 3) идентичность бренда жителей может контрастировать с образом, который город стремится показать вовне. Участие жителей в процессе создания бренда города способствует формированию чувства принадлежности. Когда люди вносят свой вклад, они склонны оценивать бренд выше. Отчужденные жители, напротив, станут причиной потери идентичности места и его социального наследия, негативного отношения к бренду.

Примеры решения городского бренда и вовлечения жителей в этот процесс

В российских городах большинство разработанных брендов ориентированы на туристов и используются в основном в сувенирной продукции и редко – в городской среде. Вовлечение местных жителей в этот процесс – более сложная, чем в европейской среде, задача. Это обусловлено как историческими факторами, так и недоверием к власти. Исследования опросов, проведенные во время проектирования брендинга городской среды и после внедрения проектов, показали, что привязанность жителей и их идентификация с малой родиной сильнее в том случае, если новые образы городской среды соответствуют их представлению и визуальной идентичности данной территории.

Разработка идентичности города и создание бренда в России начались с Москвы и Санкт-Петербурга. После реализации первых проектов аналогичные концепции были разработаны в Воронеже, Саратове, Краснодаре, Нижнем Новгороде, Калининграде, Ижевске, Челябинске, Иванове. К 2024 г. уже несколько десятков городов разработали и внедряют регламентированный дизайн-код и городской бренд, основанный на визуальных паттернах конкретного места.

Ярким примером является проект городского бренда Санкт-Петербурга, запущенный в 2019 г., разработку которого администрация города заказала Студии Артемия Лебедева [11]. В ходе работы было проведено исследование восприятия города местными жителями, в котором поучаствовало около 800 чел. Были собраны наиболее часто повторяющиеся ассоциации, которые вызывает Петербург у горожан и туристов. На основе этих ассоциаций был создан бренд (рис. 1). Однако он был воспринят жителями неоднозначно и разрабатывался для туристической сферы. Сейчас городское пространство Санкт-Петербурга оформлено в синем и белом цветах. Использованы образы корабля, волн, «Медного всадника», якоря, косого дождя и многие другие элементы (рис. 2).



Рис. 1. Туристический логотип Санкт-Петербурга от студии АртЛебедев¹
Fig. 1. Tourist logo of Saint-Petersburg from the ArtLebedev studio



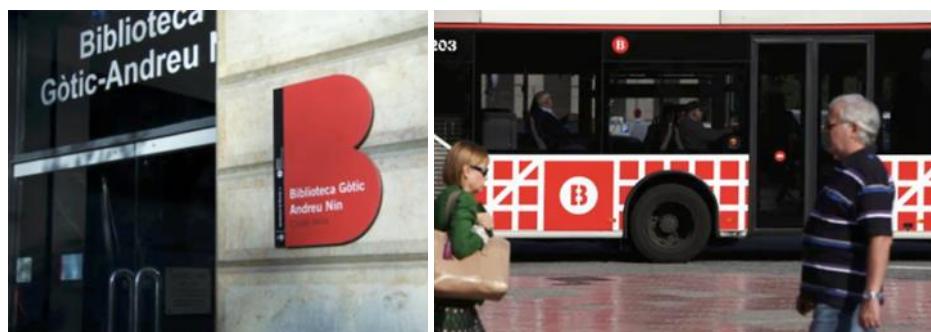
Рис. 2. Отражение культурных и исторических особенностей Санкт-Петербурга в городской среде: баннеры, адресные аншлаги
Fig. 2. Reflection of cultural and historical features of Saint-Petersburg in the urban environment: banners, address notices

¹ Иллюстрации artlebedev.ru

Большая вовлеченность жителей в проекты благоустройства прослеживается в малых городах и населенных пунктах. В 2019 г. в ПГТ Усть-Донецком Ростовской области, административном центре Усть-Донецкого района, был спроектирован и сооружен сквер «Юность» в рамках национального проекта «Формирование комфортной городской среды». Проект прошел общественные обсуждения, в голосовании приняли участие более 6 тыс. жителей, (19 %) при общей численности населения 32 тыс. Второе место заняла аллея Славы, которая также была благоустроена – обновлены осветительные приборы и покрытие тротуара. Кроме того, организованы скверы в станицах Мелиховская и Раздорская [21].

Опыт создания и использования городского дизайна на основе визуальной идентичности можно рассмотреть на примере зарубежных городов: Амстердама (Нидерланды), Барселоны (Испания), Лондона (Великобритания) и др. Эти города исследовали визуальную идентичность и использовали ее для формирования городской среды и новых объектов, что в значительной степени привело к увеличению объема потока туристов.

Городской бренд Барселоны, подчеркивающий ее каталонское наследие и модернистскую архитектуру, сыграл важную роль в трансформации города после Олимпиады 1992 г. (рис. 3). Этот процесс привел к существенному росту туризма и международному признанию города. Для определения ценностей и атрибутов, определяющих бренд Барселоны, администрацией был проведен опрос жителей. По результатам исследования основными ценностями для жителей оказались: креативность (19,6 %), дизайн и городское развитие (19 %), креативная инфраструктура (10,4 %). Респонденты также отметили важность развития молодежи (8,5 %), производство городом новых идей в разных сферах (7,7 %), социальные инновации (7,5 %) и эмоциональные инновации (7,2 %). Метод опроса оказался наиболее эффективным инструментом, т. к. дал возможность представить широкий спектр вариантов, показать участникам концептуальные решения, охватить большое количество людей и получить данные в удобном для анализа формате. Успешный опыт Барселоны применим и в других городах.



*Rис. 3. Городской бренд Барселоны: объекты городской среды
Fig. 3. Barcelona's urban brand: urban environment*

Лондонская агломерация представляет собой сочетание традиционных визуальных паттернов старой Англии и современных трендов архитектуры

и городского дизайна. Город демонстрирует высокий индекс качества жизни. В руководстве по застройке рекомендуется проводить опросы и вовлекать общественные инициативные группы в процесс проектирования [12, 13].

Опыт вовлечения инициативных групп показал рост удовлетворенности жителей работой администрации и дизайнеров, но усложнил процесс принятия решений.

В 2014 г. в г. Порту (Португалия) была проведена работа по изучению идентичности территории и разработан новый логотип (рис. 4). Было создано около 70 вариативных знаков в синем цвете, отражающих важные элементы города.



Рис. 4. Логотип Porto, вариации знаков²

Fig. 4. Porto logo, sign variations

Город активно развивается: растет численность населения, увеличивается поток туристов, расширяется бизнес. Бренд успешно используется в городской среде, бера свое начало в синей кафельной плитке, имеющей широкое распространение (рис. 5). В статье Беатрис Касиас и Патрисии Монтеиру проанализирована стратегия создания нового городского бренда с привлечением жителей в этот процесс [14].



Рис. 5. Применение визуальных паттернов в дизайне городской среды³

Fig. 5. Application of visual patterns in urban environment

После разработки логотипа была собрана фокус-группа из жителей для выявления главных составляющих городского бренда, которые усиливают их

² Иллюстрации сайта www.sostav.ru

³ Там же.

привязанность к территории. Участники группы были специально отобраны: они включали разные возрастные категории, пол, работали в разных сферах, жили в разных районах города и представляли разные экономические и культурные слои населения, чтобы создать максимально полную картину восприятия бренда. Фокус-группа позволила исследователям понять, идентифицируют ли жители себя с городским брендом, а также оценить их взгляд на собственную роль в совместном создании бренда. Участники фокус-группы отметили, что вовлечение жителей в обсуждение бренда было очень важным шагом, подчеркнув, что они должны были быть вовлечены в процесс с самого начала, на этапе формирования брифа и разработки стратегии бренда [14].

Брендинг Амстердама (Нидерланды) был проведен решением городского совета в 2004 г. Опросы проводились не только среди жителей и представителей бизнеса, но и среди туристов. Концепция была основана на опыте брендинга Нью-Йорка, однако проектировщики приоритетным сделали образ общества Амстердама и местные традиции. Брендинг оказался успешным: через 10 лет, когда его заменили на новый, более минималистичный вариант с простыми формами, общественность восприняла изменения очень негативно [24].

Другим европейским примером эффективного брендинга является Стокгольм (Швеция). Характерный архитектурный и культурный образ Стокгольма был переосмыслен и утвержден после проведения проектировщиками общественного исследования. С момента внедрения бренда «Стокгольм – столица Скандинавии» в 2005 г. популярность города, внутренние инвестиции и туризм значительно возросли. В 2010 г. Стокгольм стал первой в истории Европы зеленой столицей, а в 2012 г. был признан лучшим регионом для прямых иностранных инвестиций. Более 50 муниципалитетов вокруг Стокгольма используют бренд ««Стокгольм – столица Скандинавии» для продвижения своих территорий на международном уровне. Восприятие другими организациями-партнерами использования брендинга Стокгольма также было впечатляющим: по данным исследования Школы бизнеса Стокгольмского университета, более 200 других организаций по всему региону Стокгольма использовали бренд «Столица Скандинавии» в собственном маркетинге [25].

Исследование мнения жителей Чэнду, культурного города в Китае, интересно своим подходом. С помощью онлайн-опроса было собрано 285 действительных анкет, а для проверки гипотез исследования использовалось моделирование структурных уравнений. Результаты показали, что культурные характеристики города оказывают значительное положительное влияние на формирование эмпатической связи населения с городским брендом. Эмоциональная, эмпатическая связь с брендом города играет большую положительную роль в развитии привязанности к городу, патриотизма малой родины и поведения жителей в городской среде. Результаты исследования способствуют более полному пониманию влияния культурного бренда города на жителей, предоставляя теоретическую основу и практическое руководство для дальнейшего управления городским брендом [8].

Исследования подтверждают, что проекты брендинга и средового дизайна оцениваются выше, если были проведены опросы населения и учтено их мнение. Проекты, не учитывающие мнение жителей, внедренные «сверху» по

частному или государственному заказу, без этнографических и социальных исследований, чаще получают негативные отзывы и критику [15–17]. Для сохранения приверженности жителей своей малой родине, снижения оттока людей из малых городов и поселений необходимо, чтобы облик городской среды вызывал чувство принадлежности и привязанности к территории.

Наиболее эффективными оказались методы опроса и работа с фокус-группами, которые проводились в разных городах и позволили выявить ценность городской среды и главные составляющие бренда города. Также привлекались к участию общественные инициативные группы и даже туристы.

В России доступно несколько способов опроса населения по вопросам благоустройства территорий, организации городской среды, нового строительства и городских проектов. Это, например, портал «Госуслуги», где проводятся опросы по благоустройству территорий, веб-портал федерального проекта «Формирование комфортной городской среды» [20], входящего в национальный проект «Жилье и городская среда». Администрация Санкт-Петербурга и некоторых других городов также проводит опросы населения через свои веб-ресурсы.

Фирмы, осуществляющие проект по дизайну городской среды или благоустройству, могут также распространять опросы в виде общедоступных анкет через свои каналы в социальных сетях. Такой подход показал положительные результаты в Томске при подготовке дизайн-проекта парка «Звездный» [18].

Заключение

Данное исследование важно для дальнейшей теоретической разработки темы брендинга территории. Оно подчеркивает значимую роль жителей города не только как пользователей городскими ресурсами, но и как амбассадоров культуры родного города, оказывающих влияние на его развитие. Более успешным становится бренд города, направленный не только на внешнюю аудиторию – туристов, но и на внутреннюю – местных жителей, сообщества. Бренд становится эффективным, когда он связан с идентичностью места, определенной через взаимодействие с жителями, когда он реализуется не только как логотип, но и через благоустройство городской среды, развитие отдельных уникальных районов, использование элементов бренда в дизайне города. Активное участие жителей на всех этапах создания бренда и обратная связь, как важной заинтересованной стороны в формировании городской среды при анализе результатов, оказывают значительное влияние на успешную реализацию стратегий брендинга. Также большое значение имеют социальные, экологические и экономические условия развития территории, которые могут быть усилены за счет участия в программах развития регионов.

Исследование городской среды и степени отождествления жителей с территорией, зависящей от ее соответствия образу локальной идентичности, и изучение самоидентификации жителей с местом представляют интерес в дальнейшем исследовании бренда города.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абаимова Е.Л. Дизайн как общекультурный и национальный феномен : специальность 24.00.01 «Теория и история культуры» : диссертация на соискание ученой степени кандидата философских наук. Ростов-на-Дону, 2009. 147 с.

2. *Котлер Ф., Асплунд К., Рейн И., Хайдер Д.* Маркетинг мест. Москва : МИФ, 2008. 384 с. ISBN 5-315-00027-3.
3. *Динни К.* Брендинг территорий. Лучшие мировые практики / под. ред. К. Динни ; пер. с англ. В. Сечной. Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2013. 336 с. ISBN 978-5-91657-655-9.
4. *Лэндри Ч.* Креативный город. Москва : Издательский дом «Классика – XXI», 2011. 399 с. ISBN 978-5-89817-340-1. EDN: QOMBSD
5. *Визгалов Д.В.* Брендинг города. Москва : Ин-т экономики города, 2011. 155 с. ISBN 978-5-8130-0157-4. EDN: QONFRJ
6. *Горгородова Ю.В.* Архитектурно-градостроительные уровни территориального брендинга // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2002. № 1. С. 101–106. DOI: 10.25628/UNIPR.2022.52.1.017. EDN: RLYMQZ
7. *Аристова А.В., Краснобаев И.В.* Архитектурно-градостроительный брендинг территории как ключевой фактор развития города // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (35). С. 7–15. EDN: VUSKCD
8. *Zhao W.* The effect of self-city brand connection on city brand ambassadorial behavior in a cultural city: the mediating role of city attachment // Place Branding and Public Diplomacy. 2024. DOI: 10.1057/s41254-024-00346-5. EDN: ZLYBER
9. *Водопьянов Г.В., Хамаганова К.В.* Визуальные коды культурной идентичности в современном медиапространстве // Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение. 2018. № 32. С. 229–235. DOI: 10.17223/22220836/32/22. EDN: YSQYVF
10. *Соммерс А.* Брендинг города: теория и примеры. Лондон : Palgrave Macmillan, 2014. 312 с. ISBN 978-1-137-36979-4.
11. *Проект бренда* Санкт-Петербурга от Студии Артемия Лебедева. URL: <https://www.sostav.ru/publication/logotip-peterburga-ot-studii-lebedeva-14525.html> (дата обращения: 15.10.2024).
12. *Planning and Urban Design* on behalf of Dacorum Borough Council. Hemel Hempstead Town Centre. Paradise Design Code, Draft Supplementary Planning Document, 2022. Department for Levelling Up, Housing & Communities // Tibbalds. URL: <https://www.tibbalds.co.uk/work/projects/paradise-design-code-hemel-hempstead-2> (дата обращения: 15.02.2025).
13. *Dann J., Satchwell H.* Area-based design codes: What are they and how can they work, 2024. URL: <https://www.theplanner.co.uk/2024/01/22/area-based-design-codes-what-are-they-and-how-can-they-work> (дата обращения: 06.10.2024).
14. *Casais B., Monteiro P.* Residents' involvement in city brand co-creation and their perceptions of city brand identity: a case study in Porto // Place Brand Public Dipl. 2019. № 15. P. 229–237. DOI: 10.1057/s41254-019-00132-8. EDN: AWSMNB
15. *Tøttenborg A., Ooi CS., Hardy A.* Place branding through public management lenses: supplementing the participatory agenda // Place Brand Public Dipl. 2023. № 19. P. 114–127. DOI: 10.1057/s41254-021-00252-0
16. *Ribeiro M., Sousa Á., Providência F.* Identidade Visual e Corporativa: a marca Porto. Corporate and visual identity: the brand Porto: Conference // III Congresso Ergotrip DesignAt: Natal, Rio Grande do Norte. Brasil, 2014.
17. *New identity for the city of Porto* // Studio Eduardo Aires. URL: <https://www.behance.net/gallery/20315389/New-identity-for-the-city-of-Porto#> (дата обращения: 15.10.2024).
18. *Результаты опроса жителей Томска по вопросу дизайн-проекта парка «Звездный»* // Среда. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgclefindmkaj/https://sredatomsk.ru/wp-content/uploads/2021/04/otchet-po-anketirovaniyu-park-zvezdnyj.pdf> (дата обращения: 12.12.2024).
19. *Escalas J.E., Bettman J.R.* You Are What They Eat: The Influence of Reference Groups on Consumers' Connections to Brands // Journal of Consumer Psychology. 2003. V. 13. № 3. P. 339–348. DOI: 10.1207/s1532 7663jcp1303_14
20. *Федеральный проект «Формирование комфортной городской среды»* реализуется в рамках национального проекта «Инфраструктура для жизни» // Формирование комфортной городской среды. URL: <https://gorodsreda.ru> (дата обращения: 12.12.2024).
21. *Опрос по благоустройству: сквер «Юность» в ПГТ Усть-Донецком Ростовской области, административном центре Усть-Донецкого района, по программе финансирования благоустройства в рамках национального проекта «Формирование комфортной городской*

- среды» // Администрация Усть-Донецкого района. URL: http://ustdoneckaya-adm.ru/static_132 (дата обращения: 12.12.2024).
22. Эксперты: брэндинг городов необходим жителям для самоидентификации // Агентство ИТАР-ТАСС. Красноярский экономический форум, 2019. URL: <https://tass.ru/v-strane/6268292> (дата обращения: 12.12.2024).
 23. Ворон О.В., Старченко Р.А., Серин П.А., Донежук М.Ю. Региональная идентичность и миграционные ориентации жителей Калининградской области. Научный дайджест. 2024. № 5 (34). 18 с. URL: https://www.hse.ru/data/2024/07/09/1904497088/Human_Capital_NCMU_Digest_34_Regional_Identity_2024.pdf (дата обращения: 12.12.2024).
 24. Борисова Е. Place Branding: как появились самые известные бренды городов? // 34travel. URL: <https://34travel.me/post/place-pranding-1> (дата обращения: 12.12.2024).
 25. Stubbs J. Stockholm the capital of Scandinavia. Ten years on // Place Branding and Public Diplomacy. 2016. № 12. P. 187–194. DOI: 10.1057/s41254-016-0014-x

REFERENCES

1. Abaimova E.L. "Design as a general cultural and national phenomenon". PhD Thesis. Rostov-on-Don, 2009. 147 p. (In Russian)
2. Kotler Ph., Asplund I., Haider D., Rein I. Marketing Places. Moscow: MIF, 2008. 384 p. ISBN 5-315-00027-3. (Russian translation)
3. Dinnie K. (Ed.) City Branding: Theory and Cases. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2013. 336 p. ISBN 978-5-91657-655-9. (Russian translation)
4. Landry Ch. The Creative City. Moscow: Klassika – XXI. 2011. 399 p. ISBN 978-5-89817-340-1. EDN: QOMBSD (Russian translation)
5. Vizgalov D.V. Branding of the City. Moscow: Institute of Urban Economics, 2011. 155 p. ISBN 978-5-8130-0157-4. EDN: QONFRJ (in Russian)
6. Gorgorova Y.V. Architectural and Urban Planning Levels of Territorial Branding. *Akademicheskii vestnik Uralniproekt RAASN*. 2002; (1): 101–106. DOI: 10.25628/UNIIP.2022.52.1.017 EDN: RLYMQZ (In Russian)
7. Aristova A.V., Krasnobaev I.V. Architectural and Urban Planning Branding of Territories as a Key Factor of City Development. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2016; 1 (35): 7–15. EDN: VUSKCD (In Russian)
8. Zhao W. The Effect of Self-City Brand connection on city brand ambassadorial behavior in a cultural city: The mediating role of city attachment. In: Place Branding and Public Diplomacy. 2024. DOI: 10.1057/s41254-024-00346-5. EDN: ZLYBER
9. Vodopyan V.G., Khamaganova K.V. Visual Codes of Cultural Identity in Modern Media Space. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Kul'turologiya i iskusstvovedenie*. 2018; (32): 229–235. DOI: 10.17223/22220836/32/22. EDN: YSQYVF (In Russian)
10. Sommers A. City Branding: Theory and Examples. London: Palgrave Macmillan, 2014. 312 p. ISBN 978-1-137-36979-4.
11. Saint-Petersburg brand project from Artemy Lebedev Studio. Available: www.sostav.ru/publication/logeotip-peterburga-ot-studii-lebedeva-14525.html (accessed October 15, 2024). (In Russian)
12. Planning and urban design on behalf of Dacorum Borough Council. Hemel Hempstead Town Centre. Paradise Design Code, Draft Supplementary Planning Document, 2022. Available: www.tibbalds.co.uk/work/projects/paradise-design-code-hemel-hempstead-2 (accessed February 15, 2025).
13. Dann J., Satchwell H. Area-based design codes: What are they and how can they work, 2024. Available: www.theplanner.co.uk/2024/01/22/area-based-design-codes-what-are-they-and-how-can-they-work (accessed October 6, 2024)
14. Casais B., Monteiro P. Residents' Involvement in City Brand Co-Creation and their Perceptions of City Brand Identity: A Case Study in Porto. *Place Branding and Public Diplomacy*. 2019; 15: 229–237. DOI: 10.1057/s41254-019-00132-8. EDN: AWSMNB
15. Tøttenborg A., Ooi Cs., Hardy A. Place Branding Through Public Management Lenses: Supplementing the Participatory Agenda. *Place Brand Public Dipl.* 2023; (19): 114–127. DOI: 10.1057/s41254-021-00252-0
16. Ribeiro M., Sousa Á. Providência F. Identidade Visual e Corporativa: A marca Porto. Corporate and visual identity: the brand Porto. In: *Proc. 3rd Conf. Ergotrip DesignAt: Natal, Rio Grande do Norte*. Brasil, 2014.

17. New identity for the city of Porto. Studio Eduardo Aires. Available: www.behance.net/gallery/20315389/New-identity-for-the-city-of-Porto# (accessed October 15, 2024).
18. Tomsk residents survey on design project of the Zvezdny Park environment. Available: <https://sredatomsk.ru/wp-content/uploads/2021/04/otchet-po-anketirovaniyu-park-zvezdnyj.pdf> (accessed December 12, 2024). (In Russian)
19. Escalas J.E., Bettman J.R. You Are What They Eat: The Influence of Reference Groups on Consumers' Connections to Brands. *Journal of Consumer Psychology*. 2003;13 (3): 339–348. DOI: 10.1207/s15327663jcp1303_14
20. The federal project "Formation of a Comfortable Urban Environment" is implemented within the framework of the national project "Infrastructure for Life" Formation of a Comfortable Urban Environment. Available: <https://gorodsreda.ru> (accessed December 12, 2024). (In Russian)
21. Survey on landscaping: Yunost Square in the village of Ust-Donetsk, Rostov Region, the administrative center of the Ust-Donetsk district, under the landscaping financing program within the framework of the national project "Formation of a Comfortable Urban Environment". Administration of the Ust-Donetsk district. Available: http://ustdoneckaya-adm.ru/static_132 (accessed December 12, 2024). (In Russian)
22. Experts: urban branding is necessary for residents to self-identify. ITAR-TASS Agency. Krasnoyarsk Economic Forum, 2019. Available: <https://tass.ru/v-strane/6268292> (accessed December 12, 2024). (In Russian)
23. Voron O.V., Starchenko R.A., Serin P.A., Donezhuk M.Yu. Regional Identity and Migration Orientations of Residents of the Kaliningrad Region. *Nauchnyi daidzhest*. 2024; 5 (34): 18. Available: www.hse.ru/data/2024/07/09/1904497088/Human_Capital_NCMU_Digest_34_Regional_Identity_2024.pdf (accessed December 12, 2024).
24. Borisova E. Place branding: how did the most famous brands of cities appear? Available: <https://34travel.me/post/place-pranding-1> (accessed December 12, 2024).
25. Stubs J. Stockholm the Capital of Scandinavia. Ten Years On. *Place Branding and Public Diplomacy*. 2016; (12): 187–194. DOI: 10.1057/s41254-016-0014-x

Сведения об авторах

Абаймова Евгения Леонидовна, канд. фил. наук, доцент, Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, abaimova@sfedu.ru

Чегге Валерия Сергеевна, магистрант, Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, chegge@sfedu.ru

Authors Details

Evgeniya L. Abaimova, PhD, A/Professor, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str., 344006, Rostov-on-Don, Russia, abaimova@sfedu.ru

Valeria S. Chegge, Graduate Student, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str., 344006, Rostov-on-Don, Russia, chegge@sfedu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.04.2025
Одобрена после рецензирования 02.10.2025
Принята к публикации 09.10.2025

Submitted for publication 18.04.2025
Approved after review 02.10.2025
Accepted for publication 09.10.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 48–64.

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 (6): 48–64.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 712.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-48-64

EDN: DEASUR

ФОРМИРОВАНИЕ КАРТ СОВМЕСТИМОСТИ РАСТЕНИЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА ДЛЯ ГОРОДСКИХ ЛАНДШАФТОВ

Ярослава Игоревна Ермолаева, Александра Сергеевна Кошечкина, Олеся Олеговна Смолина

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. Актуальность. Озеленение городских ландшафтов является крайне важным фактором в формировании окружающей среды, однако вопросам рационального подбора растительных компонентов часто уделяется недостаточное внимание. Для повышения качества и презентабельности озеленения, его устойчивости необходимо учитывать ряд критериев и особенностей разных видов растений при их совместной посадке. В настоящем исследовании освещены вопросы сочетаемости древесно-кустарниковых и травянистых растений Западно-Сибирского региона на основе следующих параметров: корневая система, освещенность, состав, влажность и плодородность почвы, зимо- и засухоустойчивость, период цветения растений.

Цель исследования. Разработка карт совместимости древесно-кустарниковых и травянистых растений Западно-Сибирского региона для повышения качества и презентабельности городских ландшафтов.

Методы. Применены ландшафтный, картографический и теоретический анализ, методы сравнения, синтеза и моделирования.

Результаты. Разработано тридцать шесть карт совместимости, включающих шестьсот тридцать сочетаний древесно-кустарниковых и травянистых растений Западно-Сибирского региона. На основе полученных данных составлены древесно-кустарниковые и цветочно-травянистые композиции, рекомендуемые для совместной посадки в практике городского озеленения.

Ключевые слова: городской ландшафт, древесно-кустарниковые растения, травянистые растения, озеленение, совместимость растений

Для цитирования: Ермолаева Я.И., Кошечкина А.С., Смолина О.О. Формирование карт совместимости растений Западно-Сибирского региона для городских ландшафтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 48–64. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-48-64. EDN: DEASUR

ORIGINAL ARTICLE

MAPPING OF WEST SIBERIAN PLANT CONSISTENCY FOR URBAN LANDSCAPES

Yaroslava I. Yermolayeva, Aleksandra S. Koshechkina, Olesya O. Smolina
*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russia*

Abstract. Although greening of urban landscapes is an extremely important for the environment formation, less attention is given to it. To improve the urban landscape quality and representation, it is necessary to consider the criteria and characteristics of different plant species when planting them together. This work highlights the consistency of woody-shrubby and herbaceous plants based on such parameters as the root system, illumination, composition, soil humidity and function, winter- and drought resistance, flowering period.

Purpose: The purpose of this study is mapping of West Siberian woody-shrubby and herbaceous plant consistency in order to improve the landscapes quality and representation.

Methodology: Landscape, cartographic and theoretical analysis, synthesis, comparison, modeling.

Research findings: Mapping of West Siberian woody-shrubby and herbaceous plants includes 36 samples and 630 combinations. The compositions are mapped and recommended for joint planting of urban landscapes.

Keywords: urban landscape, trees and shrubs, herbaceous plants, landscaping, plant compatibility

For citation: Ermolaeva Ya.I., Koshechkina A.S., Smolina O.O. Mapping of West Siberian Plant Consistency for Urban Landscapes. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 48–64. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-48-64. EDN: DEASUR

Введение

В большинстве стран мира, включая Россию, уделяется недостаточное внимание озеленению городских ландшафтов. Несмотря на потенциальную значимость зеленых насаждений для улучшения качества жизни горожан и оптимизации экологического состояния городской среды [1], многие территории остаются неэффективно озелененными.

Растения являются важными элементами городской среды, т. к. образуют естественный микроклимат (регулируя ветровой, температурный и влажностный режимы), улучшают качество воздуха, обеспечивают биоразнообразие, оказывают благоприятное влияние на психоэмоциональное состояние человека и повышают привлекательность окружающих территорий. Поэтому исследования, направленные на изучение и улучшение состояния городских пространств, являются крайне актуальными и востребованными. Это работы таких исследователей, как И.Л. Бухарина [1], В.А. Горохов [2], О.П. Лаврова [3], О.Н. Бобылева, И.Ю. Бочкива, Д.А. Бочкив [4], М.Р. Колпакова, А.А. Гончар, Т.А. Чиндяева [5], С.Н. Бобылев, И.С. Завалеев, А.И. Завалеева, И.Ю. Ховавко [6], В.С. Зазуля [7] и др.

Цель исследования – разработка карт совместимости древесно-кустарниковых и травянистых растений Западно-Сибирского региона для повышения качества и презентативности городских ландшафтов.

Задачи исследования:

1) изучить понятие аллелопатии, проанализировать экологические паспорта Западно-Сибирского региона и Новосибирской области и особенности их составления;

2) разработать карту совместимости древесно-кустарниковых и травянистых растений Западной Сибири и сформировать научно-практические рекомендации к ним по высадке растений с учетом корневой системы, освещенности, состава, влажности и плодородности почвы, зимо- и засухоустойчивости, периода цветения;

3) разработать композиции из древесно-кустарниковых, травянистых и цветочных растений на основе авторских карт совместимости для повышения качества и репрезентативности городских ландшафтов Западной Сибири.

Научная новизна заключается в разработке авторского материала в виде карт совместимости, включающих тридцать шесть древесно-кустарниковых и травянистых видов растений и шестьсот тридцать комбинаций их сочетаний, а также композиций на основе созданных карт с формулировкой научно-практических рекомендаций по высадке растений.

Материалы и методы исследования: на основе данных экологического паспорта Новосибирской области [10], материалов и методических рекомендаций [11–13] путем теоретического анализа, синтеза, сравнения и моделирования была разработана карта совместимости древесно-кустарниковых и травянистых растений (табл. 1–3).

Разработка карт совместимости древесных, травянистых и цветочных растений Западной Сибири

В процессе исследования выявлено, что в открытом доступе отсутствуют таблицы сочетаемости деревьев, кустарников и травянистых растений, в отличие от таблиц сочетаемости плодовых и садовых культур. Учет совместимости древесно-кустарниковых пород важно рассматривать для повышения качества и репрезентативности ландшафтов, обеспечения их устойчивости, создания благоприятных условий для роста, снижения фитопатологии растений и пр. В связи с этим авторами внесен вклад в разработку материала по данной теме.

Была проведена классификация деревьев, кустарников и травянистых растений, произрастающих в Западной Сибири. В результате анализа рассмотренного материала была создана карта совместимости растений (табл. 1–3) по данным экологического паспорта Новосибирской области [10]. Карта включает в себя одиннадцать видов деревьев, десять видов кустарников и пятнадцать видов цветов и трав, что составляет в общем количестве 36 растений и 630 возможных сочетаний.

Оценка качества сочетаний растений проводилась на основе восьми критериев (обозначены в табл. 1–3 символами «+» и «–», соответственно совпадение и несовпадение) в следующем порядке: корневая система, освещенность, состав, влажность и плодородность почвы, зимо- и засухоустойчивость, период цветения растений.

Однако помимо указанных факторов следует учитывать аллелопатические свойства организмов.

Таблица 1

Карта совместимости древесных растений

Table 1

Woody plant consistency mapping

№ п/п	Растения	Взаимодействие											
		Вяз гладкий	Дуб черешчатый	Ель обыкновенная	Ива белая	Клен остролистный	Лиственница сибирская	Можжевельник обыкновенный	Пихта сибирская	Рябина обыкновенная	Туя западная	Яблоня Сиверса	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	Вяз гладкий	2 ++++ +++	1 ++++ +++	2 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	2 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	
2	Дуб черешчатый		2, 7 +- ++++ +-	8 ++ ++++ +	2 ++++ +++	2 ++++ +++	2, 9 ++ ++++	7, 10 ++ +++	7 ++ ++	2, 7 ++ ++	2 ++ ++	2 ++ ++	
3	Ель обыкновенная			2 ++++ +++	1 ++++ +++	7 +- ++	7, 9 +- ++	1 ++++ +++	2 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	
4	Ива белая				2, 8 ++ +++ +	2, 7 +- ++++ --	2, 9 ++ ++- +	8, 10 ++ ++ +	1 ++++ +++	2 ++++ +++	2, 8 ++ ++ +		
5	Клен остролистный					1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++	
6	Лиственница сибирская						1 ++++ +++	7 +- ++	2, 7 ++ -+	7 ++ ++	1 ++++ +++		
7	Можжевельник обыкновенный							3, 7 +- ++ ++	2, 7 +- ++	7 ++ ++	1 ++++ +++		
8	Пихта сибирская								3 ++++ +++	1 ++++ +++	1 ++++ +++		
9	Рябина обыкновенная									2 ++++ +++	2 ++++ +++		
10	Туя западная										1 ++++ +++		
11	Яблоня Сиверса												

Таблица 2
Карта совместимости древесно-кустарниковых растений

Table 2

Woody plant and shrub consistency mapping

№ п/п	Растения	Барбарис Тунберга	Гортензия метельчатая	Кизильник блестящий	Карагана древовидная	Миндаль степной	Можжевель- ник даурский	Роза майская	Спирея японская	Хеномелес Мауля	Чубушник венечный
		0	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Вяз гладкий	3 +++++ ++	2, 4 +++++ ++-	2, 4 +++++ ++-	4 +++++ ++	1 +++++ +++	1 +++++ +++	2, 4 +++++ +-	4, 5 +++++ -+	2, 4, 5 +++++ ---	2, 4, 5 +++++ ---
2	Дуб черешчатый	5, 10 +++ +++-	4, 5, 7 +- ++	4, 5, 7 +- ++	2, 4, 5, 7, 8 +- ++	5, 10 +++ +-+	2, 5, 8 ++ +-	4, 5, 7 +- ++	2, 4, 7 +- ++	4 +++++ ++	4, 7, 8 ++- +++-
3	Ель обыкновенная	7, 3 +- ++	2, 4 +++++ ++-	2, 4 +++++ ++-	4 +++++ ++	7 +- ++	7, 9 +- ++	2, 4 +++++ +-	4, 5 +++++ -+	2, 4, 5, 7 +- ++	2, 4, 5 +++++ ---
4	Ива белая	10 +++ +++-	4, 8 ++ +++-	4 +++++ ++	2, 4 ++ +-	10 +++ +++	2 +++++ ++	4, 8 ++ ++	2, 4, 5 +++++ ---	4, 5, 8 ++ ++	4, 5 +++++ -+
5	Клен остролистный	3 +++++ ++	2, 4 +++++ ++	2, 4 +++++ ++	4, 8 ++ ++	1 +++++ ++	8 ++ ++	2, 4 +++++ +-	4, 5 +++++ -+	2, 4, 5 +++++ --	2, 4, 5, 8 ++ --
6	Лиственница сибирская	3 +++++ ++	2, 7 +- +	2, 7 +- +	7 +- +	1 +++++ ++	1 +++++ ++	2, 7 +- ++	5, 7 +- ++	2, 5 +++++ --+	2, 5, 7 ++ --+
7	Можжевельник обыкновенный	3 +++++ +-	2, 4, 7 +- -	2, 4, 7 +- -	4, 7 +- -	1 +++++ ++	1 +++++ ++	4, 7 +- -	4, 7 +- +	2, 4, 5, 9 +- --	2, 4, 5, 7 +- --
8	Пихта сибирская	3, 7 +- +	3, 4 +++++ ++	3, 4 +++++ ++	8, 4 ++ ++	7 +- +	7 +- +	3, 4 +++++ --	4, 5 +++++ -+	3, 4, 5, 7, 9 +- --	4, 5, 8, 10 +- --
9	Рябина обыкновенная	7 +- +	4 +++++ ++	4, 8 ++ ++	2, 4, 8 ++ -	3, 7, 8 +- +	2, 7, 8 +- +	4 +++++ ++	2, 4, 5, 8 ++ ++-	4, 5, 7 +- ++	4, 5, 8 +- ++

Окончание табл. 2
End of table 2

№ п/п	Растения	Барбарис Тунберга	Гортензия метельчатая	Кизильник блестящий	Карагана древовидная	Миндаль степной	Можжевельник даурский	Роза майская	Спирея японская	Хеномелес Маулея	Чубушник венечный
		0	12	13	14	15	16	17	18	19	21
10	Туя западная	3, 7 + +++++ +	2, 4 +++++ +--	2, 4 +++++ +--	4 +++	7 + +++++ +	7 + +++++ +	2, 4 +++++ +--	4, 5 +++++ -+--	2, 4, 5, 7 + ---	2, 4, 5 +++++
11	Яблоня Сиверса	1 +++++ +++	2, 4 +++++ +--	2, 4 +++++ +--	4, 8 ++ +++++ +++	1 +++	8 +++++ +--	2, 4 +++++ +--	4, 5 +++++ -+--	2, 4, 5, 8 + ---	2, 4, 5, 8 + -
12	Барбарис Тунберга		4 +++++ ++	1 +++++ +++	3 +++++ ++	3 +++++ ++	3 +++++ ++	1 +++++ +++	3, 4, 5 +++++ ---	5 +++++ -++	4, 5 +++++
13	Гортензия метельчатая			4 +++++ ++	2, 4, 8 ++ +++ -	3, 4 +++++ +--	2, 8 ++ +++ +	1 +++++ +++	2, 5 +++++ ---+	4, 5 +++++ -+--	4, 5, 8 ++ ++ +
14	Кизильник блестящий				2 +++++ ++ +	3, 4 +++++ +--	2 +++++ ++	1 +++++ +++	2, 4, 5 +++++ ---	5 +++++ -++	4, 5 +++++
15	Карагана древовидная					4 +++++ ++	1 +++++ +++	2, 8 ++ +++ +	4, 5 +++++ -+--	2, 5, 8 ++ ++ +	2, 4, 5 +++++ ---
16	Миндаль степной						1 +++++ +++	3 +++++ ++	4, 5 +++++ -+--	3, 4, 5 +++++ ---	3, 4, 5 +++++ ---
17	Можжевельник даурский							2, 8 ++ +++ +	5 +++++ -++	2, 5, 8 ++ ++ +	2, 5 +++++ ---+
18	Роза майская								2, 5 +++++ ---+	5 +++++ -++	2, 5 +++++ ---+
19	Спирея японская									2, 4 +++++ +--	2 +++++ -++
20	Хеномелес Маулея									4, 8 ++ +++++	
21	Чубушник венечный										

Таблица 3
Карта совместимости древесно-кустарниковых и травянистых растений
Table 3
Woody and herbaceous plant and shrub consistency mapping

№ п/п	Растения	Ирис обыкновенный														
		Калужница	Клевер		Лаванда узколистная		Манник большой Варистата	Мелисса	Обриста	Овсяница	Просо	Рогоз	Ромашка садовая	Флокс шиловидный	Шалфей	Эхинацея
			22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1	Вяз гладкий	1 6 ++++ +++ ++	6 (1)* 4 +++ +++ ++	6 (4)* 2, 4 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	1 ++++ +++ ++	2, 4 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	6 (4)* 4 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	
2	Дуб черешчатый	5, 7 + +++ - +	6 (5, 8)* + +++ ++	6 (4, 5)* +++ +++ ++	4, 5 9 +++ ++	2, 4, 5 +++ ++	5 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	2, 5, 8, 9 +++ ++	5 +++ +++ ++	2, 5 +++ +++ ++	6 (4, 5)* +++ +++ ++	2, 4, 5, 8, 9 +++ ++ ++	4, 5, 8, 10 +++ ++ ++	2, 4 +++ ++ --	
3	Ель обыкновенная	1 6 (10)* ++++ +++ +++ - +	6 (4, 10)* +++ +++ ++	4, 10 7 +++ ++	4, 5, 7 +++ ++	10 ++ ++	3, 4, 5, 7 +++ ++	7 ++ ++	4 +++ +++ ++	7 +++ +++ ++	6 (4, 10)* +++ +++ ++	7 +++ +++ ++	4, 7 +++ +++ ++	4, 7 +++ +++ ++	4, 5 +++ ++ --	
4	Ива белая	2, 8 ++ +++ +	8 ++ +++ ++	4, 8 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	4, 5, 10 +++ ++	4, 8 +++ +++ ++	4, 5, 8 +++ ++	2 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	2, 8 +++ +++ ++	2, 8 +++ +++ ++	2, 4 +++ +++ --	4, 10 +++ +++ --	2, 4, 5 +++ ++ --	
5	Клен остролистный	1 6 (8)* ++++ +++ ++	6 (4)* 4 +++ +++ ++	3, 4, 5 +++ ++	1 +++ +++ ++	2, 4 +++ +++ ++	8 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	6 (4)* - +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	4, 8 +++ +++ ++	4, 8 +++ +++ ++	2, 4, 5 +++ ++ --	
6	Лиственница сибирская	7 + --- +++ ++	6 (2, 7)* --- +++ ++	6 (2, 7)* 2, 7 +++ +++ ++	5 +++ +++ ++	2, 7 +++ +++ ++	2, 5 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	7 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	6 (2, 7)* - +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	5, 7 ++ +++ ++	
7	Можжевельник обыкновенный	7 + --- +++ ++	6 (4, 7, 9)* --- +++ ++	7, 9 +++ +++ ++	3, 4, 5 +++ ++	7, 9 +++ +++ ++	2, 4 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	7 +++ +++ ++	9 +++ +++ ++	6 (7, 9)* --- +++ ++	1 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	4 +++ +++ ++	2, 4, 5 +++ ++ --	
8	Пихта сибирская	1 6 (10)* ++++ +++ ++	6 (9, 10)* +++ +++ ++	4, 9 + +++ ++	3, 4, 5, 7 +++ ++	9 - +++ ++	3, 4, 7 +++ ++	3, 7 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	7, 9 +++ +++ ++	6 (4, 9, 10)* --- +++ ++	7 +++ +++ ++	4, 7 +++ +++ ++	4, 7 +++ +++ ++	3, 4, 5 +++ ++ --	

Продолжение табл. 3
Continuation table 3

№ п/п	Растения	Ирис обыкновенный														
		22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
9	Рябина обыкновенная	2 ++++ ++ +	6 (8)* 4 +++ ++ ++	6 (4)* 4 +++ ++ ++	4 +++ ++ ++	3, 4, 5, 7 ++ ++	4 ++++ ++ ++	4, 5, 7 ++ ++	2, 7, 8 ++ ++	2, 4 +++ ++ ++	2, 7 ++ ++ ++	6 (1)* ++ ++	2, 4, 7 ++ ++	2, 4, 7, 8 ++ ++	3, 4, 7, 8 ++ ++	2, 4, 5 ++ ++
10	Тuya западная	1 ++++ +++ +++ +++	6 (2)* 4)* 2, 4 +++ ++ --	6 (2, 4)* 4)* 2, 4 +++ ++ --	4, 5, 7 ++ ++	2, 4 ++++ ++ --	4, 5, 7 ++ ++	7 ++ ++	4 +++ ++ ++	7 ++ ++ ++	6 (2)* ++ ++	4, 7 ++ ++	4, 7 ++ ++	4, 7 ++ ++	4, 5 ++ ++	
11	Яблоня Сиверса	1 ++++ ++ +++ ++	6 (2, 8)* 6 (2, 4)* 2, 4 +++ ++ --	6 (2, 4)* 2, 4 +++ ++ --	4, 5 ++ ++	2 ++ ++	2, 4, 5 ++ ++	8 ++ ++	4 +++ ++ ++	1 ++ ++	6 (2, 4)* ++ ++	1 ++ ++	4, 8 ++ ++	4, 8 ++ ++	4, 5 ++ ++	
12	Барбарис Тунберга	10 * +++ ++ + ++ ++	6 (4, 10)* 3 +++ - ++ ++ +	6 (4, 10)* 3 +++ - ++ ++ +	3, 4, 5 ++ ++	10 ++ ++	3, 4, 5 ++ ++	3, 8 ++ ++	3 +++ ++ ++	3 +++ ++ ++	6 (10) * ++ - ++ ++	3 +++ ++ - ++	3, 8 ++ ++	3, 8 ++ ++	3, 5 ++ ++	
13	Гортензия метельчатая	2, 4 ++++ ++ - ++	6 (4)* (1)* 1 +++ ++ ++	6 (4)* (1)* 1 +++ ++ ++	1 +++ ++ ++	3, 4, 5 ++ ++	1 ++++ ++ ++	5 ++ ++	2, 4, 8 ++ ++	2 ++ ++	4 +++ ++ ++	2 +++ ++ ++	2, 8 ++ ++	3, 8 ++ ++	2 ++ ++	
14	Кизильник блестящий	2 ++++ ++ ++ +	6 (4)* (4)* 1 +++ ++ ++	6 (4)* (4)* 1 +++ ++ ++	1 +++ ++ ++	2, 4, 5 ++ ++	4 +++ ++ ++	8 ++ ++	2, 4 ++ ++	2 ++ ++	6 (1)* ++ ++	2 +++ ++ ++	2, 8 ++ ++	3, 8 ++ ++	2, 5 ++ ++	
15	Карагана древовидная	8 ++ ++ +++ ++	6 (4, 8)* 6 (4, 8)* 1 +++ ++ ++	6 (4, 8)* 6 (4, 8)* 1 +++ ++ ++	2, 4, 8 ++ ++	2, 5, 8 ++ ++	2, 4, 8 ++ ++	1 +++ ++ ++	4 +++ ++ ++	8 ++ ++	6 (8)* ++ ++	8 ++ ++	1 +++ ++ ++	1 +++ ++ ++	1 ++ ++	
16	Миндаль степной	1 ++++ ++ ++ ++	6 (3)* 3, 4 +++ ++ ++	6 (4, 10)* 3, 4 +++ ++ ++	4, 5 ++ ++	4, 10 --	3, 4, 5 ++ ++	3, 8 ++ ++	4 +++ ++ ++	4 +++ ++ ++	6 (10) * ++ - ++	4 +++ ++ ++	8 ++ ++	4, 8 ++ ++	4, 5 ++ ++	

Продолжение табл. 3
Continuation table 3

№ п/п	Растения	Ирис обыкновенный														
		22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
17	Можжевельник даурский	8 ++ ++++ +	6 (2, 8)* ++ ++ +++ - +	6 (2, 8)* ++ ++ +++ - +	2, 8 ++ ++ +++ - +	5, 8 ++ ++ +++ ++	2, 8 ++ ++ +++ +	2, 5, 8 ++ ++ ++	1 +++ +++ ++	8 ++ ++ +++ +	8 ++ ++ +++ +	6 (2, 8)* ++ ++ +++ - +	8 ++ ++ +++ ++	1 +++ +++ ++	1 +++ +++ ++	5, 8 ++ ++ +++ ++
18	Роза майская	2 ++++ ++ +++ +	6 (4)* ++ ++ +++ ++	6 (1)* ++ ++ +++ ++	1 +++ +++ +++ ++	2, 5 ++ ++ +++ - +	1 ++++ +++ +++ ++	5 ++ ++ +++ ++	2, 8 ++ ++ +++ -	5 ++ ++ +++ -	2 ++ ++ +++ -	6 (1)* ++ ++ +++ ++	1 +++ +++ ++	2, 8 ++ ++ +++ - +	3, 8 ++ ++ +++ - +	2, 5 ++ ++ +++ - +
19	Спирея японская	4, 5 ++++ +- ++ --	6 (2, 4, 5)* ++ ++ ++ --	6 (2, 5)* ++ ++ ++ - +	2, 5 ++ ++ +++ ++	1 ++ ++ ++ +	2, 5 ++ ++ ++ +	2 ++ ++ ++ -	4, 5, 8 ++ ++ ++	4, 5 ++ ++ ++ +	5 ++ ++ ++ +	4, 5 ++ ++ ++ +	5 ++ ++ ++ +	5 ++ ++ ++ +	5, 8 ++ ++ ++ ++	5, 8 ++ ++ ++ ++
20	Хеномелес Маулея	2, 5 ++++ +- +	6 (4, 5)* ++ ++ ++ +	6 (4, 5)* ++ ++ ++ +	5 ++ ++ ++ +	2, 4, 9 ++ ++ ++ +	5 ++ ++ ++ +	4 ++ ++ ++ -	2, 5, 8, 9 ++ ++ ++	5 ++ ++ ++ -	2, 5 ++ ++ ++ -	6 (5)* ++ ++ ++ -	2, 5 ++ ++ ++ -	2, 5, 8, 9 ++ ++ ++ -	3, 5, 8 ++ ++ ++ -	2 ++ ++ ++ -
21	Чубушник венечный	2, 4, 5 ++++ +- +	6 (4, 5)* ++ ++ ++ -	6 (5)* ++ ++ ++ +	5 ++ ++ ++ ++	2, 9 ++ ++ ++ ++	5 ++ ++ ++ ++	1 ++ ++ ++ ++	2, 4, 5, 8, 9 ++ ++ ++	5 ++ ++ ++ ++	5 ++ ++ ++ ++	6 (5)* ++ ++ ++ ++	2, 5 ++ ++ ++ ++	2, 5, 8, 9 ++ ++ ++ ++	3, 5, 8 ++ ++ ++ ++	2 ++ ++ ++ --
22	Ирис обыкновенный		6 (2)* ++ ++ ++ -	6 (2, 9)* ++ ++ ++ -	2, 9 ++ ++ ++ -	5, 7, 9 ++ ++ ++ -	2, 9 ++ ++ ++ -	2, 5, 7 ++ ++ ++	2, 7, 8, 9 ++ ++ ++	1 ++ ++ ++ ++	7, 9 ++ ++ ++ ++	6 (2, 9)* ++ ++ ++ ++	7 ++ ++ ++ ++	7, 8, 9 ++ ++ ++ ++	3, 7, 8 ++ ++ ++ ++	5 ++ ++ ++ --
23	Калужница			4, 9 ++ ++ ++	6 (4, 9)* ++ ++ ++	6 (7, 9, 5, 4, 2)* ++ ++ ++	5, 7, 9 ++ ++ ++	6 (4, 5, (9)* 2)* ++ ++ ++	6 (2, 7, 8, 9)* ++ ++ ++	6 (2, 7, 8, 9)* ++ ++ ++	6 (2, 7, 8, 9)* ++ ++ ++	4, 9 ++ ++ ++ ++	6 (2, 7)* ++ ++ ++	6 (2, 7)* ++ ++ ++	6 (2, 4, 7, 8, 8)* ++ ++ ++	6 (2, 4, 7, 8, 8)* ++ ++ ++
24	Камыш				6 (1)* ++ ++ ++	6 (2, 5, 7, 9)* ++ ++ ++	6 (1)* ++ ++ ++	6 (2, 5, 7, 9)* ++ ++ ++	6 (2, 4, 7, 8, 9)* ++ ++ ++	6 (2, 4, 7, 8, 9)* ++ ++ ++	6 (2, 4, 7, 8, 9)* ++ ++ ++	1 ++ ++ ++ ++	6 (2, 7, 9, 9)* ++ ++ ++	6 (2, 7, 9, 9)* ++ ++ ++	6 (2, 7, 8, 9, 10)* ++ ++ ++	6 (2, 5, 9)* ++ ++ ++

Продолжение табл. 3
Continuation table 3

№ п/п	Растения	Ирис обыкновенный														
		22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
		Калужница	Камыш	Клевер	Лаванда узколистная	Манник большой Варисегата	Мелисса	Обриета	Овсяница	Просо	Рогоз	Ромашка садовая	Флокс шиловидный	Шалфей	Эхинацея	
25	Клевер				2, 7, 5 + ++ -- +	1 ++++ ++++ ++ -++ ++	5, 7, 9 + ++ ++ -++ ++	2, 7, 9 + ++ ++ -++ ++	2, 9 +++ ++ -++ ++	2, 7 ++ ++ -++ ++	1 +++ ++ -++ ++	2, 7, 9 + ++ ++ -++ ++	2, 7, 9 + ++ ++ -++ ++	3, 7, 9 + ++ ++ -++ ++	2, 5, 9 + ++ ++ -++	
26	Лаванда узколистная					2, 5, 7, 9 + ++ -++	2, 9 +++ ++ -++ ++	4, 5 ++ ++ ++	5, 7, 9 + ++ -++	5, 9 +++ ++ -++	6 (2, 5, 7, 9)* ++ -++	5, 9 ++ ++ -++	5 ++ ++ -++	5, 9 ++ ++ -++	7, 9 ++ ++ -++	
27	Манник большой Варисегата					2, 5, 7, 9 + ++ -++	2, 7, 8, 9 ++ -++	2, 9 ++ ++ -++	2, 7 ++ ++ -++	6 (1)* ++ -++	2, 7, 9 + ++ -++	2, 7, 8, 9 + ++ -++	3, 7, 8, 9 + ++ -++	2, 5, 9 + ++ -++		
28	Мелисса					2, 4, 5, 8, 9 ++ -++	2, 5, 7 + ++ -++	2, 5, 9 ++ -++	6 (2, 5, 7)* ++ -++	2, 5, 7 + ++ -++	2, 5, 7, 8 + ++ -++	3, 5, 7, 8 + ++ -++	2 ++ ++ -++			
29	Обриета						7, 9 + ++ +++	2, 8, 9 ++ -++	2, 7, 8, 9 ++ -++	2, 8, 9 + ++ -++	2 ++ ++ +	3, 9 ++ ++ +	2, 5, 7, 9 + ++ -++			
30	Овсяница							7, 9 + ++ +++	2, 9 ++ -++	7 + ++ +++	7, 9 + ++ +++	3, 7 + ++ +++	5 + ++ +++			
31	Просо								2, 7 + ++ +	9 ++ + +++	8, 9 ++ + +++	3, 8, 9 + ++ +	5, 7, 9 + ++ -			
32	Рогоз								2, 7, 9 + ++ -++	2, 7, 8, 9 + ++ -++	3, 7, 8, 9 + ++ -++	2, 5, 9 + ++ -++				
33	Ромашка садовая									8, 9 ++ + +++	3, 8 ++ + +++	5, 7 ++ - +++				

Окончание табл. 3
End of table 3

№ п/п	Растения	Ирис обыкновенный	Калужница	Кампания	Клевер	Лаванда узколистная	Манник большой Вариегата	Мелисса	Обриста	Овсяница	Просто	Рогоз	Ромашка садовая	Флокс шиловидный	Шалфей	Эхинацея
34	Флокс шиловидный													3, 9 +++ -- +++	5, 7, 9 + ++ -++	
35	Шалфей													3, 5, 7 + + ++		
36	Эхинацея															

Условные обозначения:

- 1 – благоприятная совместимость по всем рассматриваемым параметрам растений в группе;
 - 2 – обеспечение достаточного полива (необходимо обеспечить достаточный полив растения-гигрофита в группе);
 - 3 – избегание избыточного полива (не допускать переувлажнения почвы для растения-ксерофита в группе – по возможности высаживать рельефно выше относительно растения-гигрофита/мезофита);
 - 4 – цветение в разные месяцы растений в группе (необходимо организовать плавный переход цветения** в композиции для обеспечения презентативности в течение сезона);
 - 5 – обеспечение утепления (необходимо организовать утепление незимоустойчивого** растения в группе. Для утепления корневой системы используются некоторые из органических материалов, например: листья, солома, опилки, торф, для защиты от морозов применяются нетканые материалы и каркасные укрытия);
 - 6 – разные среды обитания (одно растение в группе преимущественно произрастает в переувлажненных (болотистых) почвах, второе растение предпочитает почвы средней или низкой влажности);
 - 7 – требования к освещению (одно из растений в группе предпочитает большую освещенность**, в связи с чем необходимо обеспечить открытое пространство для беспрепятственного попадания солнечных лучей к растению, например соблюдать нормируемое расстояние между посадками, учитывая диаметр кроны крупных растений во взрослом виде, а также темп роста);
 - 8 – почвенные условия (разные требования к типу почв, в связи с чем нужно обеспечить подсыпку конкретного типа грунта** необходимого объема для благоприятного роста растений в группе);
 - 9 – подкормка (требования к удобрению почв** для одного или двух растений в группе. Подкормка может быть корневой и внекорневой, внесение удобрений при поливе, питание растворами и/или смесями органического и минерального происхождения);
 - 10 – разное отношение к влажности (растение-гигрофит требует обязательного полива в группе, в отличие от растения-ксерофита).
- * В скобках указаны дополнительные параметры совместимости растений, которые также необходимо учитывать, основной параметр совместимости указан цифрой.
- ** См. характеристики растений в экологическом паспорте растений Новосибирской области.

Аллелопатия представляет собой процесс стимуляции или угнетения, включающий вторичные метаболиты, производимые растениями, водорослями, бактериями и грибами, которые влияют на рост и развитие сельскохозяй-

ственных и биологических систем [8, 9]. Примером такого взаимодействия может служить возможность угнетения рядом произрастающих растений, проявляющаяся в изменении темпов роста, создании неблагоприятного микроклимата или привлечении вредоносных насекомых.

Зеленым цветом в картах (табл. 1–3) выделено наилучшее сочетание (совпадение по всем восьми параметрам), синим – отличное (несовпадение по периоду цветения), желтым – хорошее (несовпадение по составу почвы и зимо- и засухоустойчивости), оранжевым – приемлемое (несовпадение по требованиям к освещению), красным – неудачное (различное отношение и требования к влажности почвы) и белым – растения, существующие в разной среде обитания (наличие в группе растений, обитающих в водной среде). Помимо этого, в табл. 1–3 используются цифровые обозначения от одного до десяти, соответствующие особенностям сочетания растений, рассматриваемых в группе (подробнее см. условные обозначения).

Исходя из представленных выше карт совместимости, можно сделать вывод, что общее количество наилучших сочетаний (зеленый цвет) составляет 86 пар, что соответствует 13,7 % от общего числа комбинаций. Отличные сочетания (синий цвет) представлены 28 парами, что составляет 4,4 %; хорошие сочетания (желтый цвет) являются самыми многочисленными и включают 273 пары, или 43,3 %. Приемлемые сочетания (оранжевый цвет) составили 118 пар, т. е. 17,3 %; неудачные (красный цвет) – 39 пар, или 6,2 %; пары из разных сред обитания (белый цвет) составили 86 сочетаний, что также соответствует 13,7 %.

Рассматривая каждую карту совместимости по отдельным группам растений, следует отметить, что в карте совместимости древесных растений (см. табл. 1) наибольшее количество пар приходится на наилучшие сочетания (зеленый), в количестве 23 комбинаций, что составляет 41,8 %, в то время как наименьшим стало одно неудачное сочетание (красный), составляющее 1,8 % от общего числа сочетаний (55) среди древесных растений. Наибольшим количеством сочетаний в карте совместимости древесно-кустарниковых растений (табл. 2) стали хорошие сочетания (желтый) 89 пар, что соответствует 57,4 %, наименьшим – неудачные сочетания (красный) в количестве 3 пар, 1,9 %. Общее количество сочетаний составляет 155 комбинаций. В карте совместимости древесно-кустарниковых и травянистых растений (табл. 3) наибольшее – хорошие сочетания (желтый) 165 пар, 39,3 %, наименьшее – отличное сочетание (синий) 21 пар, 5,0 %. Общее количество сочетаний составляет 420 комбинаций.

Древесно-кустарниковые, травянистые и цветочные композиции для городского озеленения

На основе составленных карт (см. табл. 1–3) были разработаны различные композиции (рис. 1–4) из анализируемых растений, которые можно использовать при озеленении городских пространств, таких как парки, скверы, набережные и т. п. Подбор растений для композиций основывался на следующих четырех критериях: отношение к свету, отношение к влажности и составу почвы, а также период цветения. Для данных групп были выбраны неинвазивные виды растений, которые приспособлены к местным условиям и менее подвержены воздействию вредителей, по сравнению с инвазивными видами.

КОМПОЗИЦИЯ № 1 РЕКОМЕНДУЕМОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ВДАЛИ ОТ ЗАБОЛАЧИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ
НА ОСЕНЕЩЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

СОСТАВ КОМПОЗИЦИИ: ЯБЛОНИЯ СИВЕРСА (H = 4-8 М, D = 3-5 М)
БАРБАРИС ТУНБЕРГА (H = 3-4 М, D = 3-4 М)
МОЖЖЕВЕЛЬНИК ДАУРСКИЙ (H = 0,3-0,5 М, D = 1,5-2 М)
ШАЛФЕЙ ЛЕКАРСТВЕННЫЙ (H = 0,3-1 М, D = 0,3-1 М)

УСТОЙЧИВОСТЬ К РАЗЛИЧНЫМ УСЛОВИЯМ:

ЯБЛОНИЯ СИВЕРСА

- СИЦИОФИТ / ГЕЛИОФИБ
- МЕЗОФИТ
- СУГЛИНОК
- * В МАЙ

БАРБАРИС ТУНБЕРГА

- ГЕЛИОФИТ
- КСЕРОФИТ
- СУГЛИНОК
- * В МАЙ / VI ИЮНЬ

МОЖЖЕВЕЛЬНИК ДАУРСКИЙ

- ГЕЛИОФИТ
- МЕЗОФИТ
- СУПЕСЬ
- * НЕТ

ШАЛФЕЙ ЛЕКАРСТВЕННЫЙ

- ГЕЛИОФИТ
- МЕЗОФИТ
- СУПЕСЬ
- * VI ИЮНЬ / VII ИЮЛЬ / VIII АВГУСТ / IX СЕНТЯБРЬ

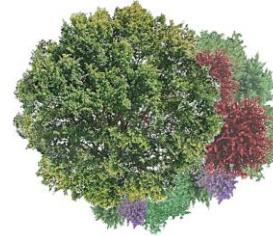


Рис. 1. Композиция № 1: яблоня Сиверса, барбарис Тунберга, можжевельник даурский и шалфей лекарственный. Рекомендации по высадке: размещать вдали от чрезмерно насыщенных влагой почв на открытых освещенных пространствах. Символом «» обозначен период цветения растений*

*Fig. 1. Composition 1 consists of Sievers apple tree, Thunberg barberry, Daurian juniper and medicinal sage. Planting recommendations: place away from excessively moist soils in open, illuminated spaces. Star * indicates the plant flowering period*

КОМПОЗИЦИЯ № 2 РЕКОМЕНДУЕМОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ВБЛИЗИ ЗАБОЛАЧИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ВНЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА СОЛНЕЧНОГО СВЕТА

СОСТАВ КОМПОЗИЦИИ: ИВА БЕЛАЯ (H = 5-20 М, D = 3-15 М)
КАЛУЖНИЦА (H = 0,2-0,4 М, D = 0,2-0,45 М)
КАМЫШ (H = 0,6-1,3 М, D = 1-1,5 М)
МАННИК БОЛЬШОЙ ВАРИЕГАТА (H = 0,6-0,9 М, D = 0,3-0,7 М)

УСТОЙЧИВОСТЬ К РАЗЛИЧНЫМ УСЛОВИЯМ:

ИВА БЕЛАЯ

- СИЦИОФИТ / ГЕЛИОФИБ
- ГИГРОФИТ
- СУПЕСЬ
- * IV АПРЕЛЬ / V МАЙ

КАЛУЖНИЦА

- СИЦИОФИТ / ГЕЛИОФИБ
- ГИГРОФИТ
- СУГЛИНОК
- * V МАЙ

КАМЫШ

- СИЦИОФИТ / ГЕЛИОФИБ
- МЕЗОФИТ
- СУГЛИНОК
- * VII ИЮЛЬ / VIII АВГУСТ / IX СЕНТЯБРЬ

МАННИК БОЛЬШОЙ
ВАРИЕГАТА

- СИЦИОФИТ / ГЕЛИОФИБ
- ГИГРОФИТ
- СУГЛИНОК
- * НЕТ



Рис. 2. Композиция № 2: ива белая, калужница, камыш и манник большой Варiegата. Рекомендации по высадке: размещать непосредственно вблизи воды вне зависимости от количества и интенсивности солнечного света. Символом «» обозначен период цветения растений*

*Fig. 2. Composition 2 consists of white willow, marsh marigold, reed and large manna grass Variegata. Planting recommendations: place directly near water, regardless of the amount and intensity of sunlight. Star * indicates the plant flowering period*

КОМПОЗИЦИЯ № 3 РЕКОМЕНДУЕМОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ВДЛЯ ОТ ЗАБОЛАЧИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

СОСТАВ КОМПОЗИЦИИ: РОЗА МАЙСКАЯ (H = 1,5-12 М, D = 0,5-5 М)
 ГОРТЕНЗИЯ МЕТЕЛЬЧАТАЯ (H = 2-5 М, D = 2-5 М)
 МОЖЖЕВЕЛЬНИК ДАУРСКИЙ (H = 0,3-0,5 М, D = 1,5-2 М)
 ЛАВАНДА УЗКОЛИСТНАЯ (H = 0,4-0,9 М, D = 0,4-0,5 М)
 ШАЛФЕЙ ЛЕКАРСТВЕННЫЙ (H = 0,3-1 М, D = 0,3-1 М)

УСТОЙЧИВОСТЬ К РАЗЛИЧНЫМ УСЛОВИЯМ:

РОЗА МАЙСКАЯ	<input checked="" type="radio"/> СЦИОФИТ / ГЕЛИОФОБ <input type="checkbox"/> МЕЗОФИТ <input type="checkbox"/> СУГЛИНОК <input checked="" type="checkbox"/> * VI ИЮНЬ / VII ИЮЛЬ / VIII АВГУСТ
ГОРТЕНЗИЯ МЕТЕЛЬЧАТАЯ	<input checked="" type="radio"/> СЦИОФИТ / ГЕЛИОФОБ <input type="checkbox"/> МЕЗОФИТ <input type="checkbox"/> СУГЛИНОК <input checked="" type="checkbox"/> * V МАЙ / VI ИЮНЬ / VII ИЮЛЬ / VIII АВГУСТ / IX СЕНТЯБРЬ
МОЖЖЕВЕЛЬНИК ДАУРСКИЙ	<input checked="" type="radio"/> ГЕЛИОФИТ <input type="checkbox"/> МЕЗОФИТ <input type="checkbox"/> СУПЕСЬ <input checked="" type="checkbox"/> * НЕТ
ЛАВАНДА УЗКОЛИСТНАЯ	<input checked="" type="radio"/> ГЕЛИОФИТ <input type="checkbox"/> КСЕРОФИТ <input type="checkbox"/> СУПЕСЬ <input checked="" type="checkbox"/> * VI ИЮНЬ / VII ИЮЛЬ / VIII АВГУСТ



ШАЛФЕЙ ЛЕКАРСТВЕННЫЙ	<input checked="" type="radio"/> ГЕЛИОФИТ <input type="checkbox"/> МЕЗОФИТ <input type="checkbox"/> СУПЕСЬ <input checked="" type="checkbox"/> * VI ИЮНЬ / VII ИЮЛЬ / VIII АВГУСТ / IX СЕНТЯБРЬ
----------------------	--

Рис. 3. Композиция № 3: роза майская, гортензия метельчатая, можжевельник даурский, лаванда и шалфей. Рекомендации по высадке: размещать на освещенных, не сильно заболачиваемых территориях. Символом «*» обозначен период цветения растений

Fig. 3. Composition 3 consists of May rose, panicle hydrangea, Daurian juniper, lavender and sage. Planting recommendations: place in lighted, not very waterlogged areas. Star * indicates the plant flowering period

КОМПОЗИЦИЯ № 4 РЕКОМЕНДУЕМОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ВБЛИЗИ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ НА ЗАТЕНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

СОСТАВ КОМПОЗИЦИИ: ТУЯ ЗАПАДНАЯ (H = 1,5-12 М, D = 0,5-5 М)
 ГОРТЕНЗИЯ МЕТЕЛЬЧАТАЯ (H = 2-5 М, D = 2-5 М)
 МОЖЖЕВЕЛЬНИК ДАУРСКИЙ (H = 0,3-0,5 М, D = 1,5-2 М)
 ИРИС ОБЫКНОВЕННЫЙ (H = 0,4-0,9 М, D = 0,4-0,5 М)
 МАННИК БОЛЬШОЙ ВАРИЕГАТА (H = 0,6-0,9 М, D = 0,3-0,7 М)
 ОВСЯННИЦА (H = 0,2-0,4 М, D = 0,3-1,2 М)

УСТОЙЧИВОСТЬ К РАЗЛИЧНЫМ УСЛОВИЯМ:

ТУЯ ЗАПАДНАЯ	<input checked="" type="radio"/> СЦИОГЛЕОФИТ <input type="checkbox"/> МЕЗОФИТ <input type="checkbox"/> СУПЕСЬ <input checked="" type="checkbox"/> * V МАЙ
ГОРТЕНЗИЯ МЕТЕЛЬЧАТАЯ	<input checked="" type="radio"/> СЦИОФИТ / ГЕЛИОФОБ <input type="checkbox"/> МЕЗОФИТ <input type="checkbox"/> СУГЛИНОК <input checked="" type="checkbox"/> * V МАЙ / VI ИЮНЬ / VII ИЮЛЬ / VIII АВГУСТ / IX СЕНТЯБРЬ
МОЖЖЕВЕЛЬНИК ДАУРСКИЙ	<input checked="" type="radio"/> ГЕЛИОФИТ <input type="checkbox"/> МЕЗОФИТ <input type="checkbox"/> СУПЕСЬ <input checked="" type="checkbox"/> * НЕТ
МАННИК БОЛЬШОЙ ВАРИЕГАТА / ОВСЯННИЦА	<input checked="" type="radio"/> СЦИОФИТ / ГЕЛИОФОБ <input checked="" type="checkbox"/> ГИГРОФИТ <input type="checkbox"/> СУГЛИНОК <input checked="" type="checkbox"/> * НЕТ



Рис. 4. Композиция № 4: тuya западная, гортензия метельчатая, можжевельник даурский, ирис обыкновенный, манник большой Варiegата и овсяница. Рекомендации по высадке: размещать вблизи повышенной влажности на затененных территориях. Символом «*» обозначен период цветения растений

Fig. 4. Composition 4 consists of western thuja, panicle hydrangea, daurian juniper, common iris, large manna grass Variegata and fescue. Planting recommendations: place near high humidity in shaded areas. Star * indicates the plant flowering period

Представленные композиции экологически адаптированы и устойчивы к городским условиям Западно-Сибирского региона. Они обладают эстетической привлекательностью благодаря гармоничному сочетанию форм и цветов растений, создавая визуально интересные и комфортные пространства для человека. Кроме того, при их разработке учитывалась практическая реализуемость: выбранные виды не требуют сложного ухода, доступны для региона, хорошо интегрируются в структуру города, что обеспечивает их долговечность и минимизирует затраты на содержание.

Заключение

Проведенное исследование выявило, что подобных карт совместимости древесно-кустарниковых и травянистых растений в открытых источниках не обнаружено, что обусловило необходимость создания данного материала. Авторский вклад заключается в разработке карт совместимости (см. табл. 1–3) и составлении композиций растений (рис. 1–4), которые могут быть использованы для озеленения городских пространств. На основе полученных данных были сформированы общие научно-практические рекомендации по высадке и интеграции растений в городскую среду:

1. При подборе озеленения следует учитывать существующий макро- и микроклимат.
2. Осуществлять подбор растений в соответствии с экологическим паспортом региона.
3. Обеспечивать разнообразие видов: деревья, кустарники, многолетние и однолетние травы и цветы для создания сезонного интереса.
4. Отдавать предпочтение антиаллергенным и неинвазивным сортам растений, чтобы уменьшить негативное влияние на окружающую среду.
5. Формировать цветники и зеленые насаждения группами для создания тематических зон и обеспечения визуального разнообразия.
6. Создавать теневые зоны с помощью деревьев с раскидистой кроной.
7. Интегрировать растения в малые архитектурные формы (скамьи, павильоны, навесы, остановочные пункты и др.).

Разработанные материалы будут интересны специалистам в области ландшафтной архитектуры и дизайна, а также городским садоводам и арborистам. Планируется дальнейшее развитие данного направления исследования, включая публикацию классификаций и карт совместимости для каждого вида растений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бухарина И.Л., Поварнина Т.М., Веденников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск : ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007. 216 с. ISBN 978-5-9620-0098-5. EDN: PYBPBD
2. Горюхов В.А. Зеленая природа города. 2-е изд/, доп. и перераб. Москва : Архитектура-С, 2005. 528 с. ISBN 5-9647-0054-3. EDN: QNKZOV
3. Лаврова О.П. Природные зрительные элементы как важный фактор формирования комфортной визуальной среды урбанизированных пространств // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 3. С. 133–141. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-3-133-141. EDN: XZYNCX
4. Бобылева О.Н., Бочкова И.Ю., Бочков Д.А. Цветочно-декоративные растения и дендрология. 2-е изд., стер. Москва : Академия, 2021. 287 с.

5. Колпакова М.Р., Гончар А.А., Чиндыяева Л.Н. Ландшафтная архитектура Сибири. Новосибирск : НГАХА, 2003. 163 с. ISBN 5-89170-021-7. EDN: QNKKYL
6. Бобылев С.Н., Завалеев И.С., Завалеева А.И., Ховавко И.Ю. Развитие «зеленой» инфраструктуры в городах // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал. 2022. Т. 14. № 3 (45). С. 48–61. DOI: 10.38050/2078-3809-2022-14-3-48-61. EDN: YLQHME
7. Зазуля В.С. Экологический комфорт и общественные пространства // Урбанистика. 2020. № 3. С. 75–90. DOI: 10.7256/2310-8673.2020.3.31732. EDN: CQYCLX
8. Аллелопатия и ее роль в продуктивности агроценозов // ЕЦПБ МГУ им. Ломоносова. 29 ноября 2022. URL: <https://ecfs.msu.ru/news/allelopatiya-i-eyo-rol-v-produktivnosti-agro-cenozov> (дата обращения: 06.04.2025).
9. Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Шоба С.А. Аллелотоксичность почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 12. С. 1530–1539. DOI: 10.31857/S0032180X22600809. EDN: NIPUKZ
10. Ассортимент растений для озеленения города Новосибирска с характеристикой применения на озелененных территориях разного типа и подтипа посадок // Приложение № 1 к приказу заместителя мэра города Новосибирска – начальника департамента культуры, спорта и молодежной политики от 19.01.2022 № 0021-ОД. 2022. 11 с.
11. 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. EDN: FBUVJZ
12. Калюгин П.Б. Основные принципы подбора древесно-кустарниковых насаждений для озеленения садово-парковых ландшафтов // Теория и практика инновационных технологий в АПК. Часть V : материалы Национальной научно-практической конференции, Воронеж, 18–19 марта 2022 г. Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. С. 56–61. EDN: CRUTAT
13. Каюков А.Н., Попов В.П. Определитель древесных растений. Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2020. 51 с. EDN: UFGWPW

REFERENCES

1. *Bukharina I.L., Povarnitsyna T.M., Vedernikov K.E.* Ecological and Biological Properties of Woody Plants in Urban Environment. Izhevsk, 2007. 216 p. ISBN: 978-5-9620-0098-5. (In Russian)
2. *Gorokhov V.A.* Green Nature in a City. 2nd edn. Moscow: Arkhitektura-S, 2005. 528 p. ISBN 5-9647-0054-3. (In Russian)
3. *Lavrova O.P.* Natural Visual Elements as an Important Factor of Comfortable Environment in Urban Spaces. *Lesnoy Vestnik*. 2018; 22 (3): 133–141. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-3-133-141 (In Russian)
4. *Bobyleva O.N., Bochkova I.Yu., Bochkov D.A.* Flowering and Ornamental Plants and Dendrology. 2nd edn. Moscow: Akademiya, 2021. 287 p. (In Russian)
5. *Kolpakova M.R., Gonchar A.A., Chindyaeva L.N.* Landscape Architecture of Siberia. Novosibirsk, 2003. 163 p. ISBN 5-89170-021-7. (In Russian)
6. *Bobylev S.N., Zavaleev I.S., Zavaleeva A.I., Khovavko I.Yu.* Development of Green Infrastructure in Cities. *Nauchnye issledovaniya ekonomicheskogo fakul'teta*. 2022; 14 (3): 48–61. DOI: 10.7256/2310-8673.2020.3.31732. EDN: CQYCLX (In Russian)
7. *Zazulya V.S.* Ecological Comfort and Public Spaces. *Urbanistika*. 2020; (3): 75–90. DOI: 10.7256/2310-8673.2020.3.31732. EDN: CQYCLX (In Russian)
8. Allelopathy and its role in the productivity of agrocenoses. (2022, November 29). Available: <https://ecfs.msu.ru/news/allelopatiya-i-eyo-rol-v-produktivnosti-agro-cenozov> (accessed April 6, 2025). (In Russian)
9. *Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Shoba S.A.* Allelochemical Toxicity of Soils: A Review. *Pochvovedenie*. 2022; (12): 1530–1539. DOI: 10.31857/S0032180X22600809. EDN: NIPUKZ (In Russian)
10. Assortment of plants for landscaping in Novosibirsk with a description of application on landscaped territories of different types and subtypes of plantings. 2022. Appendix 1 to the order No. 0021-OD of the Deputy Mayor of Novosibirsk. January 19, 2022. 11 p. (In Russian)

11. Savchuk D.Yu., Smolina O.O. Vestnik Environmental Passport of Hardy-Shrub Species for Novosibirsk Landscaping: Development and Application. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (1): 83–95. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-83-95. EDN: FBUVJZ (In Russian)
12. Kalyugin P.B. Basic principles of selection of tree and shrub plantings for landscaping garden and park landscapes. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Theory and Practice of Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex'*. Voronezh, March 18–19, 2022. Pp. 56–61. (In Russian)
13. Kayukov A.N., Popov V.P. Identifier of Woody Plants. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. 2020. 51 p. EDN: UFGWPW (In Russian)

Сведения об авторах

Ермоляева Ярослава Игоревна, студентка, Новосибирский архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, ya.yarmolayeva@gmail.com

Кошечкина Александра Сергеевна, студентка, Новосибирский архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, alexkoshechkina@gmail.com

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

Authors Details

Yaroslava I. Yermolayeva, Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, ya.yarmolayeva@gmail.com

Alexandra S. Koshechkina, Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, alexkoshechkina@gmail.com

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

Ермоляева Я.И., Кошечкина А.С. – концепция исследования, сбор и обработка информации, написание статьи.

Смолина О.О. – научное руководство и редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Yermolayeva Y.I., Koshechkina A.S. – conceptualization, data curation, collection and processing, writing—original draft preparation.

Smolina O.O. – supervision, writing—review and editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.06.2025
Одобрена после рецензирования 07.10.2025
Принята к публикации 13.10.2025

Submitted for publication 25.06.2025
Approved after review 07.10.2025
Accepted for publication 13.10.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 65–77.

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 (6): 65–77.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 728.03(571.15)

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-65-77

EDN: DSELPBM

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЖИЛИЩА ТЮРКСКИХ НАРОДОВ

Алина Максатовна Максатова, Дмитрий Викторович Карелин

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Актуальность исследования связана с возрастающим интересом к культурно-архитектурному наследию тюркских народов, традиционные жилищные формы которых представляют собой результат многовековой адаптации к разнообразным природно-климатическим условиям.

Цель работы – анализ эволюции архитектурных форм тюркских народов, отражающих синтез кочевых и оседлых традиций.

Методы исследования – сравнительный анализ объемно-планировочных и визуально-пространственных решений, географико-климатический анализ, анализ культурных традиций, отраженных в орнаменте, зонировании и строительных материалах.

Рассмотрены объемно-планировочные и визуально-пространственные особенности традиционных и современных жилищ тюркских народов в зависимости от природно-климатических условий и культурных традиций. Проанализированы основные типы традиционных жилищ, таких как юрты, срубные и глинобитные дома, выявлены их конструктивные, функциональные и декоративные особенности, отражающие социальные ценности и адаптацию к ландшафту.

Результаты. Установлено, что объемно-планировочные решения тесно связаны с климатом: в степях преобладают мобильные юрты, в горах – срубные и каменные дома, в лесостепи – срубные и глинобитные жилища. В современных жилых комплексах тюркских регионов сохраняются элементы традиционной архитектуры – зонирование, орнамент, ориентация на восток и использование природных материалов. Сделан вывод, что архитектурная преемственность тюркских народов проявляется в сохранении сакральной геометрии, орнамента, принципов внутреннего зонирования и климатической адаптации, а выявленные принципы могут быть использованы для проектирования современных жилых комплексов с этнокультурной идентичностью.

Ключевые слова: архитектурная идентичность, тюркские жилища, этнокультурное наследие, типологический анализ, орнамент, кочевые и оседлые традиции, климатическая адаптация, интеграция традиций

Для цитирования: Максатова А.М., Карелин Д.В. Влияние природно-климатических факторов на типологические особенности жилища тюркских народов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 65–77. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-65-77. EDN: DSELPBM

ORIGINAL ARTICLE

INFLUENCE OF NATURAL AND CLIMATIC FACTORS
ON TYPOLOGY OF TURKIC HOUSES

Alina M. Maksatova, Dmitrii V. Kareljin

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russia*

Abstract. This research is determined by growing interest in the cultural and architectural heritage of the Turkic peoples, whose traditional housing results from centuries of adaptation to diverse natural and climatic conditions.

Purpose: The aim of the work is to analyze the evolution of the architectural forms of the Turkic peoples, reflecting the synthesis of nomadic and sedentary traditions.

Methodology/approach: A comparative analysis of spatial planning and visual-spatial solutions, geographical and climatic analysis, and analysis of cultural traditions reflected in ornamentation, zoning, and building materials. Spatial planning and visualization of traditional and modern housing of Turkic peoples depend on natural and climatic conditions and cultural traditions. The analysis is given to the main types of traditional houses, such as yurts, log and adobe houses, are analyzed, and their structure, function, and decoration reflect social values and adaptation to the landscape.

Research findings: Spatial planning solutions closely relate to the climate: mobile yurts prevail in steppes, log and stone houses in the mountains, and log and adobe dwellings in the forest steppe. Modern houses in Turkic regions preserve elements of traditional architecture such as zoning, ornamentation, eastward orientation, and the use of natural materials.

Research implications: The identified principles can be used to design modern residential houses with ethnocultural identity.

Value: It is shown that the architectural continuity of the Turkic peoples is manifested in the preservation of sacred geometry, ornamentation, principles of internal zoning, and climatic adaptation.

Keywords: architectural identity, Turkic houses, ethnocultural heritage, typologic analysis, ornament, nomadic and sedentary traditions, climatic adaptation, integration of traditions

For citation: Maksatova A.M., Kareljin D.V. Influence of Natural and Climatic Factors on Typology of Turkic Houses. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 65–77. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-65-77. EDN: DSELM

Введение

Актуальность исследования обусловлена растущим интересом к культурно-архитектурным традициям тюркских народов. Их традиционные жилищные формы являются результатом адаптации к природно-климатическим условиям. Эти архитектурные решения остаются важным источником знаний для проектирования современных жилых комплексов с этнокультурной идентичностью.

Целью работы является анализ эволюции архитектурных форм тюркских народов с акцентом на синтезе кочевых и оседлых традиций. Внимание уделяется тому, каким образом традиционные методы строительства, адаптированные к природно-климатическим условиям, находят отражение в современных подходах к возведению легких, экологичных и конкурентоспособных сооружений.

Методы исследования включают сравнительный анализ объемно-планировочных и визуально-пространственных решений, географико-климатический анализ, а также анализ культурных традиций, отраженных в орнаменте, зонировании и использованных строительных материалах.

Результаты и обсуждение

Проведен анализ эволюции архитектурных форм тюркских народов. Жилища тюркских народов характеризовались разнообразием форм. Так, согласно описанию Ибн Фадлана, волго-камбарские булгары использовали как легкие юрты типа «тирмэ», так и деревянные дома [1]. Юрта представляет собой каркасное, круглое в плане сборно-разборное сооружение с радиусом от 6 до 12 м, состоящее из решетчатого цилиндра, который перекрывается деревянным куполом, собираемым посредством радиально расходящихся конструкций, фиксируемых посредством центрального дымового отверстия. Юрта покрывалась войлоком и тканями, позволяющими регулировать вентиляцию в жаркую пору (рис. 1) [2]. Такой тип жилища оптимален для степных и полупустынных регионов, где основными требованиями являются минимизация сопротивления ветрам и эффективная терморегуляция.

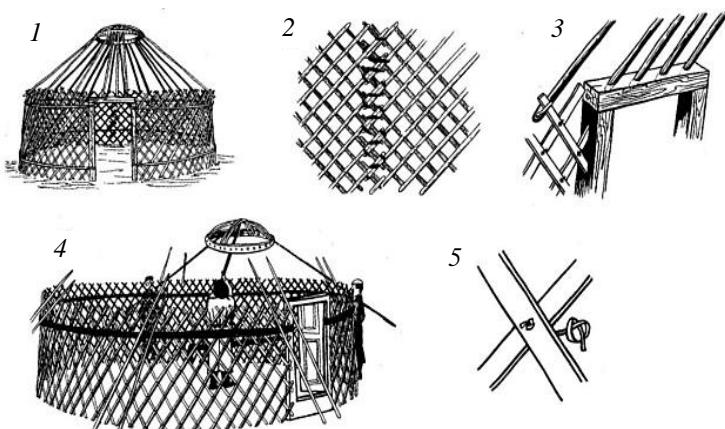


Рис. 1. Конструкция юрты и ее установка:

1 – остав; 2 – соединение звеньев решетки; 3 – дверной косяк; 4 – скрепление плафон решетки; 5 – установка остава [2]

Fig. 1. Construction of a yurt and its installation:

1 – skeleton; 2 – connection of lattice links; 3 – door jamb; 4 – lattice bar fastening; 5 – skeleton installation

Оседлые жилища: срубные и глинобитные дома

В горных и лесостепных зонах тюркской традиционной архитектуры доминируют срубные и глинобитные дома, адаптированные к снеговым и дождевым нагрузкам, а также сезонным перепадам температур (табл. 1). В этих регионах используется натуральное сырье (дерево, камень, глина), что отражает адаптацию к местным климатическим условиям. Современные жилые комплексы в тюркских регионах, в свою очередь, частично интегрируют традици-

онные элементы – зонирование, орнаментальные мотивы и использование природных материалов. При этом ориентация зданий определяется преимущественно инсоляцией и климатическими факторами, а восточная ориентация входа встречается в отдельных авторских или этноориентированных проектах. Натуральные материалы часто применяются в декоративных элементах или элитном строительстве, в то время как массовое домостроение базируется на кирпиче и бетоне (табл. 2).

Таблица 1

**Влияние природно-климатических условий
на объемно-планировочные решения**

Table 1

Natural and climatic conditions vs. spatial planning

Климатическая зона	Тип жилища	Ключевые адаптации
Степь, полупустыня	Юрта	Круглая форма, войлочное покрытие, мобильность, ориентация на восток
Горы	Аил, срубный дом	Наклонные крыши, каменные фундаменты, террасирование
Лесостепь	Сруб, глинобитный дом	Двускатная крыша, глиняная обмазка, зонирование

Таблица 2

Типологические особенности традиционных жилищ

Table 2

Typology of traditional housing

Критерий	Традиционное жилище	Современные жилые комплексы (Казахстан, Татарстан, Узбекистан)	Сохраненные элементы и тенденции
Зонирование	Четкое функциональное зонирование: мужская и женская половины, гостевая зона, хозяйствственные помещения; центр – очаг (в юрте)	Современное зонирование на приватные жилые пространства и общественные зоны (детские площадки, парки); внутренние дворы и квартальные пространства	Принцип разделения пространства по функциям, создание общественных и приватных зон, внутренние дворы как социальные центры
Ориентация	Традиционно вход ориентирован на восток – символ солнца и обновления; ориентация учитывает климатические условия (солнечное освещение, защита от ветра)	В современных проектах ориентация зданий учитывает преимущественно инсоляцию и климатические факторы; в ряде случаев сохраняется традиционная ориентация входов на восток	Частичное сохранение ориентации с учетом традиций и климатических особенностей региона

Окончание табл. 2
End of table 2

Критерий	Традиционное жилище	Современные жилые комплексы (Казахстан, Татарстан, Узбекистан)	Сохраненные элементы и тенденции
Использование материалов	Использование природных материалов: войлок (войлочные покрытия юрт), дерево (каркас, срубы), глина и камень (оседлые дома), береста	Современные материалы включают: дерево, кирпич, бетон, энергоэффективные утеплители; экологичные и локальные материалы применяются в рамках энергоэффективного строительства	Акцент на экологичность и энергоэффективность с использованием традиционных природных материалов в декоративных и конструктивных элементах
Орнамент и декор	Богатая орнаментация: геометрические и зооморфные мотивы, резьба по дереву, вышивка, ковровые узоры с символическим значением	Использование стилизованных национальных орнаментов на фасадах, в элементах благоустройства, в интерьерах общественных и жилых зданий	Сохранение и адаптация традиционных орнаментальных мотивов как культурного кода в современной архитектуре
Пространственная организация	Компактная, часто круглая или многоугольная форма (юрта); внутреннее пространство организовано вокруг очага, с четкой иерархией	Современные кварталы с четкой планировкой, общественными пространствами, зелеными зонами; акцент на создании комфортной среды для общения и отдыха	Принцип централизации общественных пространств, сохранение социальной функции дворов и площадей
Внутренние дворы	Внутренние дворы в оседлых жилищах (например, лахти), место для хозяйственных и социальных функций	В жилых комплексах внутренние дворы с детскими площадками, зонами отдыха, спортивными сооружениями	Традиция организации внутреннего двора как социального и рекреационного пространства сохраняется и развивается
Экологическая адаптация	Толстые стены, войлочные покрытия для теплоизоляции, вентиляционные отверстия (айван, шанырак) обеспечивают комфорт в сухом климате	Применение современных энергоэффективных технологий, пассивных систем вентиляции и освещения, использование природных материалов для улучшения микроклимата	Продолжение традиционных принципов климатической адаптации с применением современных технологий

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что архитектурная идентичность тюркских народов формировалась в результате синтеза кочевых и оседлых традиций, а объемно-планировочные решения тесно связаны с природно-климатическими условиями и социокультурными факторами. Основные ограничения исследования связаны с недостаточной сохранностью некоторых традиционных объектов и ограниченным доступом к ряду регионов.

Влияние природно-климатических условий на объемно-планировочные решения

Степные и полупустынные зоны. Юрта как адаптация к кочевому образу жизни: круглая форма минимизирует сопротивление ветрам, войлочное покрытие обеспечивает теплоизоляцию зимой и вентиляцию летом, а разборная конструкция позволяет быстро менять место дислокации.

Ориентация входного проема на восток защищает от холодных северных ветров – характерна для казахских и алтайских поселений.

Горные районы. Аил (срубное жилище): наклонные стены и низкие потолки противодействуют снеговым нагрузкам. По форме эти жилища строили четырехугольными, пятиугольными, шестиугольными, встречались и семиугольные [3], а каменные фундаменты с деревянными срубами обеспечивали устойчивость на склонах. Террасирование участков характерно для республик Алтая и Тувы.

Лесостепные зоны. Срубные дома с двускатными крышами обеспечивают эффективный сток дождевых вод (например, в Западной Сибири). Использование глины в качестве связующего материала повышает теплоизоляционные свойства стен.

Типология жилищ по форме и конструктивным особенностям

Классификация традиционных жилищ учитывает конусообразные (аланчики, охотничьи шалаш), цилиндрические (юрты) и многоугольные формы (срубные дома). При этом выбор материала от войлока и дерева до сырцового кирпича и глины определяется социально-культурными факторами и климатическими условиями. Соответствующая сравнительная характеристика представлена в табл. 3.

Таблица 3
Сравнительная характеристика традиционных жилищ тюркских народов
Table 3
Comparison of traditional housing of the Turkic peoples

Тип жилища	Материалы	Форма	Климатическая адаптация	Зонирование	Пример региона
Юрта	Дерево, войлок	Круглая	Ветер, перепады температур	Муж/жен. зоны	Казахстан, Алтай
Срубный дом	Дерево, камень	Прямоугольная, многоугольная	Снег, холод	Кухня/гостиная	Алтай, Кавказ
Глинобитный дом	Глина, кирпич	Прямоугольная, свод	Жара, засуха	Жилая/хоз. зоны	Средняя Азия
Каменный дом	Камень, кирпич	Прямоугольная, свод	Влага, ветер	Двор, терраса	Турция, Кавказ

Эволюция типов жилищ

Древнейшие формы: первые жилища тюркских народов были мобильными, их прототипом можно считать полусферический гуннский шалаш, появившийся в середине I тыс. н. э.

Юрта: дальнейшее развитие привело к появлению разборной решетчато-войлочной юрты (кииз уй, боз уй), отличающейся высокой куполообразной крышей и внутренним зонированием, отражающим социальную структуру семьи и традиции гостеприимства.

Переход к оседлости: с развитием земледелия и ремесел наблюдается переход к стационарным формам – глинобитным и кирпичным домам, срубам, полуzemлянкам, характерным для регионов Средней Азии и Алтая.

Современное развитие: в XX в. традиционные жилищные формы трансформируются: юрты приобретают функцию этнографических экспозиций, туристических и праздничных объектов, а массовое строительство основывается на современных материалах с сохранением отдельных этнокультурных элементов.

Гибридизация жилых пространств

Современная архитектура тюркских городов отражает тонкий синтез кочевого и оседлого образа жизни. Традиционное разделение жилого пространства на «чистую» (гостевую, мужскую) и «служебную» (семейную, женскую) зоны является наследием кочевых традиций и адаптировано к требованиям приватности в рамках исламских социальных норм [5]. Такая сегрегация пространства способствует поддержанию гендерных ролей и социальной иерархии.

Архитектурные детали (деревянные столбы, косяки, поддерживающие веранды, галереи и крыши) символизируют кочевое прошлое, резьба, включая геометрические, зооморфные и растительные мотивы, отражает космологию и мифологию тюрков. Столбы для привязи лошадей подчеркивают важность лошади в тюркской культуре.

Архитектурные детали: резные колонны и символика

Отличительной чертой тюркской народной архитектуры является использование резных деревянных столбов, известных как *косяки*, которые структурно поддерживают веранды, галереи и крыши. Эти столбы часто стилизованы под столбы для привязи лошадей – мощный символ кочевой жизни и статуса. Лошадь, центральная фигура тюркской кочевой культуры, олицетворяет мобильность, свободу и богатство. Резьба на этих столбах часто включает геометрические узоры, зооморфные мотивы и растительные узоры, отражающие тюркскую космологию и мифологию. Эти художественные элементы служат двойной цели: структурной поддержке и культурному выражению. Наличие таких мотивов как в сельской, так и в городской архитектуре демонстрирует устойчивость кочевого символизма в оседлой среде. Таким образом, декоративные и конструктивные элементы архитектуры отражают принцип сакральной геометрии и символизма, объединяя функциональность и культурное наследие тюркских традиций.

Разделение тюркского жилища на бревенчатые и глинобитные постройки

Бревенчатые конструкции. Мобильные бревенчатые сооружения: переходная форма – юрта с деревянным решетчатым каркасом (кереге), изогнутыми столбами крыши (уык) и центральным компрессионным кольцом (шанырак).

Например, у сибирских тюркских народов (южные алтайцы, теленгиты) встречаются «чадыры» – конусообразные жилища, адаптированные к местным климатическим и культурным условиям (рис. 2).

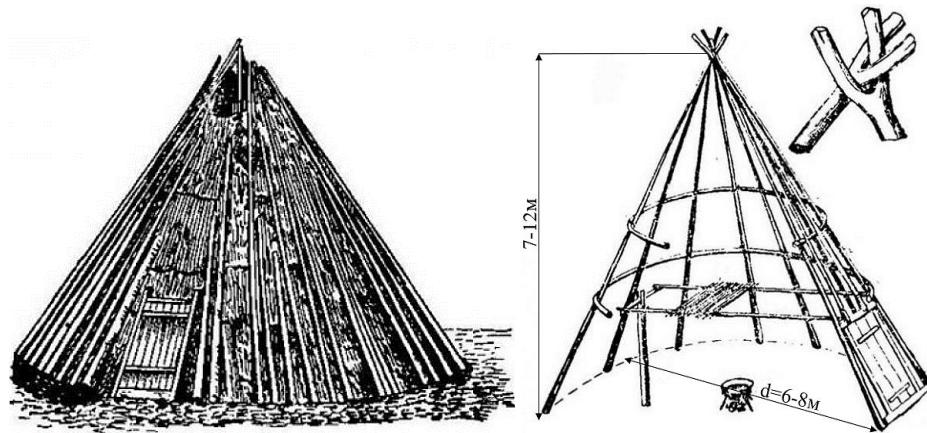


Рис. 2. Чадыр [2]
Fig. 2. Chadyr

Оседлые бревенчатые конструкции: с ростом оседлости появляются двухэтажные дома, как у алтайских челканцев, где нижний этаж используется для хранения припасов. Археологические находки (например, 2300-летняя пазыркская бревенчатая хижина) демонстрируют ранние модульные методы строительства, что родственno современным сборным конструкциям.

Глинобитные (сырцово-кирпичные) конструкции. Дома из сырого солана: в засушливых регионах Средней Азии и Туркестана преобладает строительство саманными кирпичами, представляющими собой высушенные смеси глины, соломы и навоза. Такие дома характеризуются толстостенными конструкциями (до одного метра толщиной), плоскими крышами с защитной глиняной штукатуркой, что обеспечивает пассивный терморегуляционный эффект [4]. Исторические города, такие как Туркестан и Отран, демонстрируют обширную глинобитную архитектуру. Сравнительный анализ бревенчатых и саманных конструкций представлен в табл. 4.

Таблица 4
Сравнительный анализ бревенчатых и саманных конструкций

Table 4

Comparative analysis of log and adobe structures

Аспект	Бревенчатые (деревянные) конструкции	Конструкции из самана (глинобитного кирпича)
Мобильность	Передвижные (юрты) и оседлые (бревенчатые дома)	В основном сидячий образ жизни
Первичные материалы	Древесина: сосна, кедр, можжевельник, пихта	Высушенные на солнце глиняные кирпичи, смешанные с соломой

Окончание табл. 4
End of table 4

Аспект	Бревенчатые (деревянные) конструкции	Конструкции из самана (глинобитного кирпича)
Типичные формы	Юрты (переносные), двухэтажные бревенчатые дома с каменным фундаментом	Толстостенные дома с плоскими крышами
Примеры	Телеутские аланчики (переносные решетчатые дома), алтайские чалканские дома	Дома из сырого кирпича в Туркестане, Отрапе
Конструктивные особенности	Сцепленные горизонтальные бревна, угловые выемки, каменные фундаменты	Толстые стены (до 1 м), плоские крыши с глиняной штукатуркой
Тепловые свойства	Хорошая изоляция, сохраняет тепло, дышит	Отличная тепловая масса, пассивное охлаждение/обогрев, регуляция влажности
Типы крыш	Двускатные или пирамидальные крыши, покрытия из коры или соломы	Плоские крыши с глиняным покрытием
Культурное значение	Символизирует кочевое наследие, единство семьи, мобильность	Отражает оседлый сельскохозяйственный образ жизни, постоянство
Современные адаптации	Каркасные дома в экологичном жилье, традиции деревообработки	Возрождение саманного кирпича, пассивный климат-контроль
Методы строительства	Модульная сборка юрт, точная столярка в бревенчатых домах	Кирпичи ручной формовки, раствор на основе грунта с органическими добавками
Прочность	Высокая при уходе, уязвима к влаге	Прочный в засушливом климате, уязвим к воздействию воды
Адаптация к окружающей среде	Адаптирован к лесному, горному, холодному климату	Адаптирован к засушливым, полузасушливым регионам, экстремальным температурам
Символизм	Центральное кольцо крыши (шанырак) символизирует космос и семью	Стены символизируют стабильность и постоянство
Региональные вариации	Различия в высоте и структуре крыш на Алтае и в Сибири	Различия в размере кирпича, толщине стен, обработке кровли

Современные интерпретации традиционной тюркской архитектуры

Параметрический орнамент на фасадах: современные проекты, такие как Дворец мира и согласия в Астане (Нур-Султан) (рис. 3), демонстрируют применение цифровых технологий для воссоздания традиционных тюркских орна-

ментальных узоров. Эти элементы объединяют культурное наследие с современными методами проектирования.

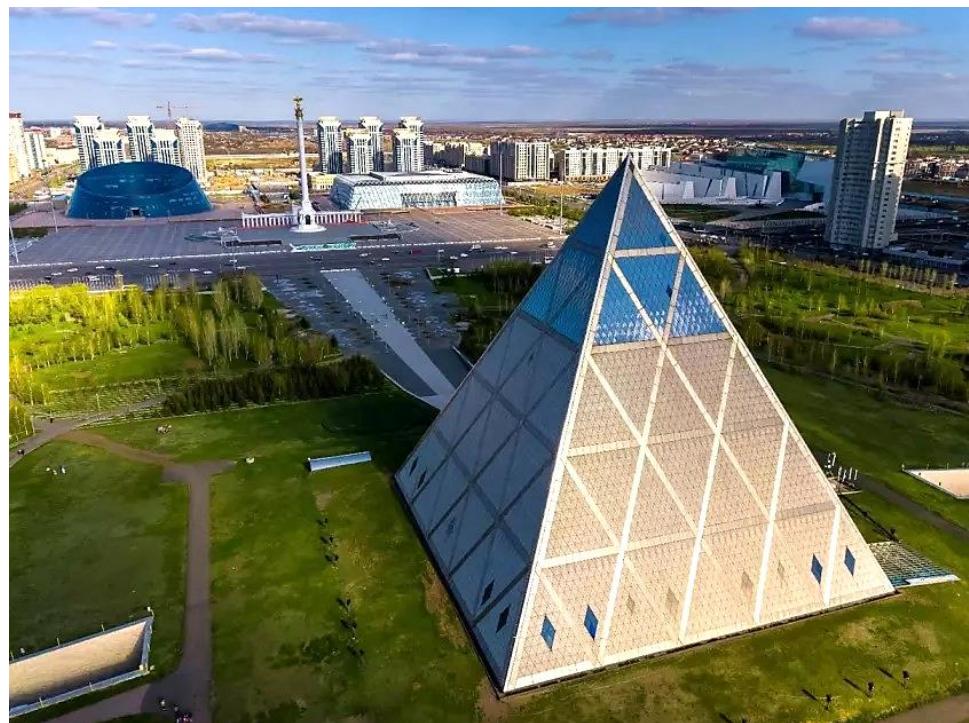


Рис. 3. Дворец мира и согласия [2]
Fig. 3. Palace of Peace and Reconciliation

Экотехнологии и устойчивые материалы: кроме интеграции традиционных орнаментов, современные архитекторы активно используют экологически чистые материалы – саманные кирпичи, натуральное дерево с изоляцией, а также пассивные системы охлаждения и отопления. Такой подход позволяет создавать энергоэффективные здания, опираясь на традиционное понимание терморегуляции и местные строительные особенности.

Практические примеры включают:

– алтайские бревенчатые дома – двухэтажные строения с каменным фундаментом, иллюстрирующие переход от кочевого к оседлому образу жизни;

– телеутские аланчики – переносные решетчатые дома, адаптированные к сибирским условиям;

туркестанские саманные дома – толстостенные глинобитные сооружения, демонстрирующие пассивный климат-контроль в Центральной Азии;

– испытательный дом Отрап – глинобитное сооружение, используемое в качестве полевой лаборатории для консервации традиционных методов строительства.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что архитектурная идентичность тюркских народов формировалась в результате синтеза коче-

вых и оседлых традиций. Объемно-планировочные решения тесно связаны с природно-климатическими условиями и социокультурными особенностями. Современные архитектурные проекты в тюркских регионах демонстрируют, как традиционные методы и мотивы могут быть интегрированы в инновационные и экологичные решения. Такой подход не только сохраняет культурное наследие, но и служит ресурсом для создания устойчивой жилой среды.

Особое внимание уделяется интеграции локальных материалов и технологий – например использованию саманных кирпичей и деревянных каркасов в сочетании с современными энергоэффективными решениями, что подтверждает глубокую связь культурных традиций с природными условиями. Наряду с активным развитием экологической энергетики в таких странах, как Казахстан, Узбекистан и Азербайджан [6], изучение и сохранение этно-архитектурного наследия становится важной задачей, способствующей устойчивому городскому развитию.

Период государственных преобразований также оказал влияние на формирование новых архитектурных форм, где традиционные мотивы сочетаются с современными технологиями, что отражается в зданиях культового и гражданского назначения [7]. Сохранение и развитие традиционных методов строительства может стать необходимым ресурсом для формирования экологичной, культурно ориентированной и устойчивой архитектурной среды будущего.

Заключение

В ходе исследования выявлено семь основных принципов архитектурной преемственности тюркских народов, которые обусловлены историко-культурным контекстом, конструктивными и декоративными особенностями традиционных жилищ, влиянием природно-климатических факторов:

- 1) принцип адаптации к природно-климатическим условиям;
- 2) внутреннего зонирования и социальной организации пространства;
- 3) сакральной геометрии и символизма;
- 4) мобильности и модульности конструкции;
- 5) интеграции кочевых и оседлых традиций в градостроительстве;
- 6) использования локальных материалов и технологий;
- 7) сохранения культурной идентичности через архитектуру.

Эти принципы отражают взаимосвязь между средой обитания, конструктивными и декоративными особенностями традиционных жилищ тюркских народов и учитывают влияние природно-климатических факторов. Они могут служить основой для проектирования современной жилой застройки с учетом этнокультурной идентичности.

В качестве материалов были использованы данные полевых этнографических наблюдений, результаты типологического, историко-культурного и графического анализа, а также сравнительный анализ традиционных и современных жилых комплексов. В работе применялись методы 3D-моделирования, анализ письменных источников и визуально-пространственных параметров.

В результате исследования установлено, что основными типами традиционных жилищ тюркских народов являются юрты, срубные и глинобитные дома. Их функциональное и внутреннее зонирование отражает социальные

и культурные ценности. Объемно-планировочные решения жилищ тесно связаны с природно-климатическими условиями: в степях преобладают мобильные юрты с войлочным покрытием, в горах – срубные и каменные дома с наклонными крышами и террасированием, в лесостепи – срубные и глинобитные жилища с двускатными крышами и глиняной обмазкой.

Выводы исследования подтверждают, что преемственность архитектурных традиций тюркских народов проявляется в сохранении сакральной геометрии, орнамента, принципов внутреннего зонирования и адаптации к природно-климатическим условиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ковалевский А.П.* Книга Ахмеда Ибн Фадлана о его путешествии на Волгу в 921–922 гг.: статьи, переводы и комментарии. Харьков : Изд-во Харьковского Ордена Трудового Красного знамени государственного университета имени А.М. Горького, 1956. 347 с.
2. *Хан-Магомедов С.О.* Проблемы динамической формы в творческих концепциях 20-х годов // Труды ВНИИТЭ. Сер. «Техническая эстетика». Вып. 33. Москва, 1982. С. 82–98.
3. Ченчулаева Э.В., Кулкова И.В. Типологические особенности традиционного жилища народов Алтая // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 39–50. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-39-50. EDN: YYIDWL
4. Культура Казахстана в тюркский период VI–XII вв. // История Казахстана. Конспект. URL: <https://itest.kz/ru/attestation/istoriya-kazahstana-4077/razdel-ix-kultura-srednevekovya/lecture/kultura-kazahstana-v-tyurkskij-period-vi-xii-v> (дата обращения: 20.06.2025).
5. Abdykarimova Sh.T. Analysis of the formation of traditional housing of the nomadic peoples of Central Asia // Вестник Казахской головной архитектурно-строительной академии. 2021. V. 2. № 80. Р. 21–27. DOI: 10.51488/1680-080x/2021.2-12. EDN: KWAVDG
6. Зеленая интеграция тюркских государств набирает обороты // Eenergy. URL: <https://eenergy.media/news/31088> (дата обращения: 20.06.2025).
7. Абдыкаримова Ш.Т. Формирование архитектуры тюркской цивилизации // Сейфуллинские чтения – 11: Молодежь и наука : материалы Республиканской научно-теоретической конференции. Том 1. Часть 3. Астана, 2015. С. 54–58.

REFERENCES

1. Kovalevsky A.P. The book by Ahmed Ibn Fadlan about his Journey to the Volga in 921–922: Articles, translations and comments. Kharkiv, 1956. 347 p. (In Russian)
2. Khan-Magomedov S.O. Problems of Dynamic Form in Creative Concepts of the 1920s. *Trudy VNIITE. Ser. Tekhnicheskaya estetika.* 1982; 33: 82–98. (In Russian)
3. Chenchulaeva E.V., Kulikova I.V. Typology of Altai Traditional Houses. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2022; 24 (2): 39–50. (In Russian)
4. Culture of Kazakhstan in the Turkic period in the 6–12th centuries. History of Kazakhstan. Available: <https://itest.kz/ru/attestation/istoriya-kazahstana-4077/razdel-ix-kultura-srednevekovya/lecture/kultura-kazahstana-v-tyurkskij-period-vi-xii-v> (accessed 20.06.2025). (In Russian)
5. Abdykarimova Sh.T. Analysis of Traditional Housing of the Nomadic Peoples of Central Asia *Vestnik Kazakhskoi golovnoi arkhitekturno-stroitel'noi akademii.* 2021; 2 (80): 21–27. DOI: 10.51488/1680-080x/2021.2-12. EDN: KWAVDG (In Russian)
6. The green integration of the Turkic states is gaining momentum. Available: <https://eenergy.media/news/31088> (accessed June 20, 2025). (In Russian)
7. Abdykarimova Sh.T. Architecture of the Turkic civilization. In: *Proc. Republican Sci. Conf. 'Seyfullin Readings'.* Vol. 1. 2015. Pp. 54–58. (In Russian)

Сведения об авторах

Максатова Алина Максатовна, магистрант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, a.maksatova@sibstrin.ru

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

Authors Details

Alina M. Maksatova, Graduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, a.maksatova@sibstrin.ru

Dmitry V. Kareljin, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, d.karelin@sibstrin.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 29.09.2025

Одобрена после рецензирования 15.10.2025

Принята к публикации 17.10.2025

Submitted for publication 29.09.2025

Approved after review 15.10.2025

Accepted for publication 17.10.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 78–89.

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 (6): 78–89.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727.15

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-78-89

EDN: GKXRBQ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМЕНКЛАТУРЫ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ЗДАНИЙ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛ С ИНКЛЮЗИВНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ ОБУЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С РАС

Ольга Николаевна Чеберева¹, Елена Юрьевна Стрельникова^{1,2}

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

²Краснодарский архитектурно-строительный техникум, г. Краснодар, Россия

Аннотация. Актуальность. В нашей стране сегодня большое значение имеет проектирование современных образовательных пространств. На основе опыта зарубежных стран в последнее десятилетие возведены уникальные школы с атриумами, современными лабораториями, универсальными кабинетами, мастерскими. Подобная архитектурно-планировочная среда отвечает потребностям нового поколения детей и современным педагогическим задачам. Однако существующие здания школ, включая типовые проекты, организуют актуальную внутреннюю среду в силу возможностей. На этом фоне дети, имеющие ограниченные возможности, в том числе с расстройствами аутистического спектра (РАС), испытывают трудности при обучении в общеобразовательных учреждениях. Это связано с тем, что архитектурная среда любого образовательного пространства – частного, муниципального, размещенного в здании, построенном по индивидуальному или типовому проекту, – не отвечает актуальным педагогическим коррекционным требованиям, в особенности характеру восприятия окружающего пространства детьми с ментальными нарушениями развития. Формирование инклюзивного объемно-планировочного пространства, которое будет эффективным и качественным для всех категорий пользователей здания школы, остается актуальной задачей, но недостаточно изучено и освещено в профильной литературе и источниках. Существующие исследования в основном сосредоточиваются на коррекционных или лечебно-медицинских учреждениях. Перед современными архитекторами стоит задача организации инклюзивного пространства в общеобразовательных школах, что требует дальнейшего изучения.

Цель. Определение новой номенклатуры помещений и их связей, позволяющих осуществлять инклюзивное обучение детей с аутизмом в здании школы, отвечающее требованиям коррекционных педагогов и дефектологов.

Методы. В работе использовались теоретические и эмпирические методы, включая анализ научной литературы, изучение нормативных документов, устный опрос специалистов-педагогов и др.

Результаты. Определена номенклатура помещений для зданий общеобразовательных школ с инклюзивными траекториями обучения, необходимая для создания пространства, в котором школьники с РАС смогут учиться и социализироваться с минимальными трудностями, а их нормотипичные сверстники получать качественное образование в гуманном сообществе.

Ключевые слова: инклюзивная архитектура, ресурсная зона, инклюзивная образовательная среда, архитектура для детей с РАС

Благодарности: П.Л. Богорад – консультант инклюзивных проектов, учитель-дефектолог Федерального ресурсного центра по организации комплексного сопровождения детей с РАС; А.Д. Степаненко – социальный педагог ГБОУ г. Москвы Школы № 2070 им. Героя Советского Союза Г.А. Вартаняна.

Для цитирования: Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю. Определение номенклатуры помещений для зданий общеобразовательных школ с инклюзивными траекториями обучения детей с РАС // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 78–89. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-78-89. EDN: GKXRBQ

ORIGINAL ARTICLE

CLASSIFICATION OF PREMISES FOR BUILDINGS OF GENERAL EDUCATION SCHOOLS WITH INCLUSIVE EDUCATIONAL TRAJECTORIES FOR CHILDREN WITH ASD

Olga N. Chebereva¹, Elena Yu. Strelnikova^{1,2}

¹*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia*

²*Krasnodar Architectural and Civil Engineering College, Krasnodar, Russia*

Abstract. Design of modern educational spaces is of great importance in our country today. Based on the foreign experience, unique schools with atriums, modern laboratories, universal classrooms, workshops have been built in the last decade. Such an architectural and planning environment meets the needs of a new generation of children and modern pedagogical challenges. However, school buildings, including standard projects, provide an up-to-date indoor environment based on their capabilities. Against this background, children with disabilities, including those with autistic spectrum disorder (ASD), demonstrate learning difficulties at educational institutions. This is due to the fact that the architectural environment of any educational space, private or municipal, located in a building built according to an individual or standard project, does not meet the current pedagogical correctional requirements, especially the nature of the surrounding space perception by children with mental disabilities. The formation of an inclusive spatial planning space that will be effective and high-quality for all categories of schoolers remains an urgent task, but it has not been sufficiently studied and highlighted in the literature. This paper mainly focuses on correctional or medical treatment facilities. Modern architects are faced with the task of organizing an inclusive secondary school that requires further investigation.

Purpose: The aim of the work is to identify a new range of rooms allowing for inclusive education for children with ASD in a school building that meets the requirements of correctional educators and speech pathologists.

Methodology: Theoretical and empirical methods, including the analysis of scientific literature, the study of regulatory documents, oral survey of educational specialists.

Research implications: Definition of nomenclature of rooms for general education school buildings with inclusive learning will create a space in which schoolers with ASD can study and socialize with minimum difficulties, and their neurotypical peers receive high-quality education in a humane community.

Keywords: inclusive architecture, resource zone, inclusive educational environment, autistic spectrum disorder

Acknowledgments: the authors would like to thank P.L. Bogorad and A.D. Stepanenko for providing valuable comments and discussions.

For citation: Chebereva O.N., Strel'nikova E.Yu. Classification of Premises for Buildings of General Education Schools with Inclusive Educational Trajectories for Children with ASD. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 78–89. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-78-89. EDN: GKXRBQ

Введение

Инклюзия – это гуманный процесс принятия и создания возможностей для интеграции в социум людей с особенностями развития. Поскольку в настоящем исследовании подробно рассматриваются приемы формирования архитектурно-пространственной среды школьных зданий, способствующей социализации людей с расстройством аутистического спектра (PAC)¹, следует в первую очередь систематизировать неоднозначную мультидисциплинарную терминологию, понимая вопросы формирования архитектурно-пространственной среды инклюзии в качестве ресурсной составляющей физического пространства образовательной среды. Диагностированный синдром PAC может характеризоваться различными сочетаниями групп симптомов. В их числе: нарушения коммуникативной сферы, устойчивые особенности социального взаимодействия, сенсорики, стереотипии и т. д. Большая часть детей с PAC имеет благоприятный прогноз адаптации в социуме. Наилучшая адаптация достигается при сопровождении специалистами – коррекционными педагогами, дефектологами – развития ребенка на всех стадиях после диагностирования синдрома. Школьный возраст, как основная стадия адаптации ребенка в социуме, немыслима вне инклюзивных моделей обучения: процесса образования, проводимого в общеобразовательной организации вместе с нормотипичными учащимися. Следует отметить, что инклюзия эффективна для детей с иными нозологиями, а также юридически закреплена в РФ^{2,3}.

В настоящее время проектируемые и модернизируемые школьные здания создаются минимально необходимой доступной средой для маломобильных групп населения (МГН), имеющих проблемы опорно-двигательного аппарата, зрения, слуха. Обязательный уровень доступности обеспечивается планировочными габаритами, достаточными для перемещения инвалидов-колясочников, средовым оснащением горизонтальных маршрутов движения различными видами тактильных элементов для слабовидящих, поручнями, отбойниками, противоскользящими покрытиями, оборудованием вертикальных маршрутов движения пандусами, подъемниками, специализированными лифтами. В отношении планировочных модулей основных помещений учебного назначения к приемам

¹ Расстройства аутистического спектра (PAC) – термин, используемый для описания группы расстройств развития центральной нервной системы – см. Как проявляются симптомы расстройств аутистического спектра (PAC) у детей раннего возраста. Пособие для родителей, семьи и друзей. 2019. С. 7.

² Ст. 79 п. 27 ФЗ РФ № 273 от 29.12.2012 «Об образовании в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 05.07.2023).

³ Письмо МОиН РФ от 07.06.2013 г. № ИР – 535/07 «О коррекционном и инклюзивном образовании детей».

формирования доступной среды относятся: пропорциональное увеличение специализированных учебных мест для инвалидов-колясочников в классных комнатах, в актовом и спортивном залах; к помещениям вспомогательного назначения – гардеробные для инвалидов-колясочников, отдельные санузлы со специализированным оборудованием, в том числе при спортзале, и т. п.

Материалы и методы исследования

Определение, сравнение и анализ помещений, которые требуются для осуществления процесса инклюзивного образования лиц с аутизмом, проводились теоретическим и эмпирическим методами. Изучение разносторонней теоретической базы, научных источников, литературы, носящей рекомендательный или законодательный формат, разработанных отечественными и зарубежными специалистами гуманитарных и технических областей науки и знания, были классифицированы авторами по категориям.

Устный опрос специалистов-педагогов позволил собрать и изучить практическую информацию, экспериментальные данные о сложностях и потребностях реализующегося инклюзивного образовательного процесса в некоторых школах г. Москвы, получить высокую экспертную оценку данной области. Совокупность эмпирической и теоретической информации была проанализирована и систематизирована авторами, проведено сравнение с существующей ситуацией в проектировании образовательных учреждений. На основании данных исследования сделаны выводы и подтверждена гипотеза о необходимости модернизации объемно-планировочных решений зданий школ.

Результаты

Инклюзивный образовательный процесс, согласно исследованиям О.А. Близнюка и Н.П. Сенченкова, формируется из двух составляющих: «инклюзивная образовательная среда» и «инклюзивное образовательное пространство», обладающих общими и индивидуальными чертами. В данном исследовании понятие «среда» имеет сугубо социально-педагогическую константу, понятие «пространство» имеет коннотации со структурой размещения и реализации инклюзивных функций в архитектурной среде, тогда как ПАП⁴ имеет прямое отношение к программированию отношений функционально-образовательных компонент – единиц структурирования и наполнения пространства с действующими субъектами образовательного процесса – учащимися и педагогами [1]. Инклюзивное образовательное пространство помимо требований безбарьерности требует особых объемно-планировочных решений и приемов средового дизайна.

Проводимые в Москве архитектурно-строительные выставки Build School 2021–2024 были в том числе посвящены и актуальным вопросам организации инклюзивного образовательного пространства в школах и ДОО в связи с достаточно широким распространением РАС. Тема освещалась на выставках специалистами сопряженных направлений, в т. ч. консультантом инклюзивных

⁴ Прикладной анализ поведения – это используемое в России название метода АВА, прикладная отрасль науки, в которой принципы бихевиоризма применяются для улучшения социально значимого поведения. – см. Шрамм Р. Детский аутизм и АВА-терапия, основанная на методах прикладного анализа поведения. 2022. С. 15.

проектов, учителем-дефектологом Федерального ресурсного центра по организации комплексного сопровождения детей с РАС П.Л. Богорад и социальным педагогом ГБОУ г. Москвы Школы № 2070 им. Героя Советского Союза Г.А. Вартаняна А.Д. Степаненко, систематизировавшими информацию о приемах модернизации архитектурно-планировочных решений школьных зданий на основе изучения психолого-педагогических методик инклюзии и опыта их реализации в общеобразовательной школе. Рекомендации данных специалистов основываются на необходимости использования в ходе обучения детей с РАС прикладного анализа поведения (ПАП), имеющего научно доказанную эффективность [2, 3, 4, 5]. Современные педагогические программы влекут за собой необходимость модернизации планировочных решений школ.

Исследования педагогов ПАП и специальные программы обучения для детей с РАС акцентируют особую актуальность определения всей совокупности специализированных приемов формирования архитектурных решений для реализации инклюзивного образования данной категории детей в условиях архитектурной модернизации существующих зданий и проектирования новых. К таким приемам относится расширение номенклатуры помещений и усложнение функционально-планировочной структуры зданий школ; интеграция в эту структуру дополнительных складских, специализированных учебных и рекреационных пространств с характерными элементами дизайна архитектурной среды, необходимыми для создания условий безопасного и продуктивного пребывания детей с РАС в здании общеобразовательного учреждения. Реализация стратегий инклюзивного обучения тесно связана с современной тенденцией дизайна архитектурной среды к полифункциональности в сочетании с высокой степенью адаптивной гибкости планировочных решений. Это достигается за счет использования модульного оборудования и корректного расчета общих площадей помещений в пересчете на удельные. Применительно к школьным зданиям адаптивность архитектурной среды означает, что все элементы здания (от объемно-планировочных решений до технических систем, обслуживающих здание и территорию) должны обеспечивать наименее ограничивающую среду для всего круга пользователей (учащихся, педагогов, персонала и посетителей). Гибкость пространств, выражаясь в свободной планировке, возможности трансформации помещений, важна для рассматриваемого направления. Наиболее характерной формой реализации инклюзии является «обратная интеграция», при которой нормотипичные учащиеся взаимодействуют с учащимися с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) на переменах, во время проведения общешкольных мероприятий и имеют доступ в помещения, проектируемые для детей с ОВЗ. Гибкость и адаптивность степени изоляции пространств, включая возможность регулировать режимы звуко- и светоизоляции помещений, особенно значимы [6, 7, 8].

Построение пространств для детей с РАС основывается на создании комфортных психоэмоциональных и сенсорных режимов, соответствующих их особенностям восприятия. Одним из основополагающих является принцип зонирования пространства. Четкая и логичная группировка помещений (преподавание/обучение, терапия/медицинское обслуживание, столовая, социальная сфера, персонал/администрация и т. д.) позволяет формировать у детей навык доверия

к непривычной среде, полной новых перцептивных стимулов. Важными условиями являются также визуальная безопасность и просматриваемость пространства, которые описываются в работах М. Мостафа, А.Д. Степаненко, П.Л. Богорад [2, 11]. Большое значение для детей с РАС играет акустический комфорт помещений: высокоскоростные системы снижения и регулировки внешних и внутренних шумов [9, 10], т. к. дети с РАС испытывают трудности в восприятии и обработке даже тех акустических стимулов, которые нормотипичными учащимися воспринимаются как фоновые. В то же время важно избегать создания «тепличных условий», изолирующих детей с РАС от реальной среды, т. к. это нежелательно для их адаптации [11].

Одним из пилотных отечественных исследований, касающихся формирования архитектурно-пространственной среды образовательных учреждений для детей с РАС, стала магистерская диссертация социального педагога А.Д. Степаненко «Проектирование предметно-пространственной среды для обучающихся с РАС в образовательной организации» [2, 4]. В данном исследовании анализ педагогико-дефектологических компонентов учебно-адаптивного процесса трансформирован в перечень пространств и помещений для инклюзивных школ.

Отечественные специалисты по инклюзивной педагогике отмечают ряд «включающих» образовательных технологий для учеников с РАС, подразумевающих минимально необходимый состав специализированных помещений:

1. Инклюзивный класс – класс, в котором обучаются дети с заболеваниями разных нозологий, включая РАС, при поддержке тыютора⁵. Класс комплектуется в соответствии с п. 3.4.14 Постановления главного санитарного врача РФ: не более 3 учащихся с ОВЗ. В данном случае требуется дополнительное место для тыютора на уроке – не требуется серьезной модернизации пространства школы.

2. Автономный класс – в нем обучаются только дети с ОВЗ, разных нозологий и разных возрастов, но с близкими уровнями когнитивного развития, в т. ч. с РАС, но одного года обучения по схожим образовательным программам. Для данной модели наряду с существующим перечнем помещений в образовательном учреждении необходим отдельный класс для каждого уровня образования (начальный, основной, средний). Это требует модернизации пространства школы за счет организации дополнительного кабинета.

3. Ресурсная зона – кабинет, в котором проходит обучение вне инклюзивных классов детей с разными нозологиями, разных возрастов, в т. ч. с РАС, дисциплинам, которые вызывают у них трудности. Занятия проводятся как индивидуально с тыютором, так и в группах. Эта модель также требует модернизации пространства школы посредством организации дополнительного кабинета со специализированными зонами.

Вопросы разработки специальных объемно-планировочных решений для реализации инклюзии в средних общеобразовательных учреждениях в нашей

⁵ Тьютор – специалист, сопровождающий образовательную деятельность учащегося – см. Гонина О.О., Морозова Е.А. Роль тыютора в психолого-педагогическом сопровождении детей с расстройствами аутистического спектра в условиях инклюзивного образования // Наука и социум: материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. 11 (1). С. 19–23.

стране начали активно обсуждаться относительно недавно^{6,7,8}. В зарубежных странах специалисты в течение нескольких десятилетий разрабатывают и обновляют нормативную базу архитектурного проектирования подобных объектов [12, 13, 14].

В зарубежных и российских источниках основным компонентом реализации инклюзивного образования в школе стал отдельный класс для обучения детей. В иностранной литературе применяется термин «основной», в отечественной – «ресурсный» [2, 4, 5]. Учитывая необходимость зонирования пространства в связи с особенностями восприятия детей с РАС, вне противоречий с зарубежными и отечественными рекомендациями, авторы предлагают организовать ресурсный класс, зонируя его на четыре функциональные части: места для индивидуальной работы с тьютором; места для групповой работы; рабочее место педагога и сенсорный уголок (рис. 1, 2).

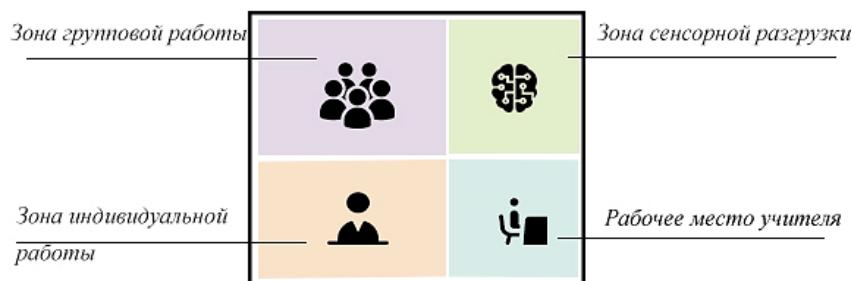


Рис. 1. Авторская схема элементов-зон ресурсной зоны
Fig. 1. Schematic of elements in the resource zone

Данный класс следует располагать смежно с изолированным кабинетом сенсорной разгрузки. Рекомендуемая площадь кабинета, в соответствии с данными о необходимом оборудовании, должна составлять 20–40 м² [2, 4, 5, 12, 13]. При минимальной площади необходимо предусмотреть кладовую, а при максимальной – кладовая рекомендуемая.

В противовес сенсорной комнате (помещению для сенсорного насыщения) детям с РАС весьма важно наличие комнаты сенсорной депривации («тихой» комнаты) [4, 5, 12, 13, 14]. Это помещение для уединения учащегося и специалиста-дефектолога с целью наиболее «мягкого» и безопасного для всех успокоения ребенка с РАС в момент его сенсорного перенасыщения (мелтдауна или дистресса). Размер помещения площадью 2,5×2,5 м является достаточным.

⁶ Рекомендации по проектированию образовательных учреждений для детей, нуждающихся в психолого-педагогической и медико-социальной помощи. Утверждены и введены в действие от 20 июня 2000 г. № 23.

⁷ Руководство по проектированию специальных (коррекционных) образовательных учреждений для обучающихся, воспитанников с ограниченными возможностями здоровья. РМД 31-15-2012. Санкт-Петербург. 35 с.

⁸ Методические рекомендации по организации инклюзивного образования в соответствии с требованиями законодательства об образовании в период введения ФГОС обучающихся с ограниченными возможностями здоровья в общеобразовательных организациях, расположенных на территории Ленинградской области. Санкт-Петербург, 2016.

Требуется: мягкая отделка пола и стен материалами, устойчивыми к санитарной обработке; скоростная бесшумная вентиляция (учитывая, что данное помещение тяготеет по функции к медицинским, согласно СП 51.13330.2011 «Защита от шума», уровни звукового давления для палат больниц в октавных полосах частот 250/500/1000 Гц должны составлять 40/34/30 дБ соответственно); системы кондиционирования воздуха; возможность полной изоляции от солнечного света (блэкаут) либо расположение в объемно-пространственном решении без организации естественного освещения.

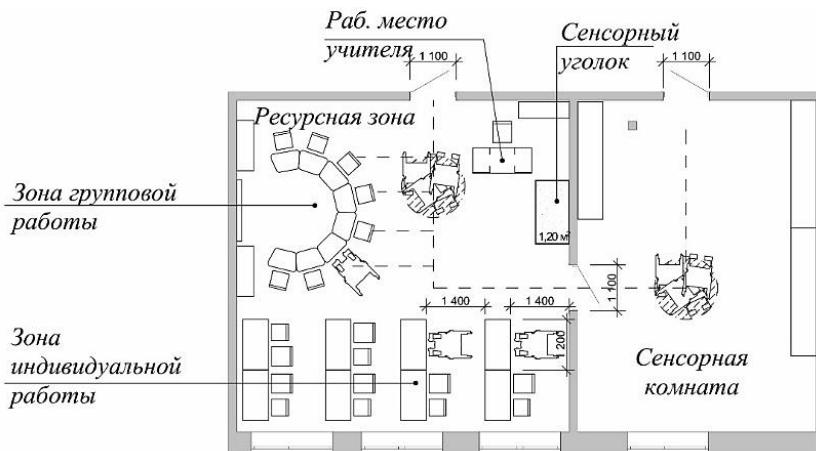


Рис. 2. Авторская схема организации блока ресурсный класс/сенсорная комната

Fig. 2. Schematic of the resource class/sensory room

Основываясь на методиках ПАП, современных педагогических программах, опыта и рекомендациях отечественных и зарубежных исследователей, специалистов-архитекторов и проектировщиков, представим расширенную (относительно действующей в нашей стране) номенклатуру пространств общеобразовательного учреждения, составляющих минимальный инклюзивный ресурс архитектурных решений, необходимый для совместного обучения нормотипичных детей и детей с особенностями развития, ОВЗ, а также с РАС [5], в виде типологического перечня:

1. Ресурсная зона на 8 учащихся [2, 12, 13].
2. Автономный класс.
3. Сенсорная комната: минимум одна на школу либо при каждой ресурсной зоне; возможно совмещение с кабинетом ЛФК.
4. Комната депривации.
5. Кабинеты индивидуальных занятий.
6. Кабинет социально-бытовой ориентации.
7. Мастерские ручного труда.
8. Оранжерея и гараж на территории школы для проведения уроков по овладению навыками садоводства и трудового обучения.
9. Смежные с основными помещениями кладовые/места хранения оборудования, обучающих материалов и т. д. [15, 16].

Эти помещения следует размещать на первом этаже в непосредственной близости от главного входа в здание школы. Важно обеспечить их удаленность от помещений и блоков с высокой акустической составляющей (спортзал, центральный холл, актовый зал, слесарные мастерские и т. п.) и мест с высоким уровнем обонятельной нагрузки (столовая, столярные мастерские и др.) [10]. Расположение кабинетов инклюзивного образования может представлять собой 1–2 кабинета или блок, состоящий из всех вышеперечисленных, в зависимости от конкретного образовательного учреждения, его вместимости, градостроительной ситуации, особенностей прилегающего участка и других факторов [12, 13, 14].

Заключение

Специалисты-педагоги и дефектологи отмечают, что реализация современных педагогических моделей и программ инклюзивного обучения детей с РАС в стенах общеобразовательных учреждений в настоящее время в нашей стране затруднена. Современная педагогическая модель является сложной и многокомпонентной. Адаптированные программы для обучения детей с особенностями развития в общеобразовательной школе требуют повышенного внимания и мастерства от учителя, дефектолога, психолога, логопеда, а также наличия отдельных, дополнительных помещений, расположенных во взаимосвязи между собой и основными функциональными блоками – входным, образовательным, столовой, спортзалом. Организация в здании помещений инклюзивного блока – основных (ресурсный, автономный классы, сенсорная и тихая комнаты, кабинеты индивидуальной работы, кабинеты социально-бытовой ориентации, оранжерея, гараж) и вспомогательно-обслуживающих (кладовые, места хранения материалов, оборудования, книг, материалов для организации работы педагогов) – является необходимым элементом организации внутреннего и внешнего пространства в современной школе. Причем это актуально как для реконструируемых, модернизируемых учреждений, так и для вновь возводимых.

Создание пространственно-средовых условий для инклюзивного обучения детей с РАС, в том числе на уровне норм и рекомендаций по проектированию, будет способствовать сплочению общества вокруг общечеловеческих ценностей, а детям позволит вырасти социально адаптированными и деятельными, самостоятельными его членами, не зависящими от государства и постоянной заботы близких.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Близнюк О.А., Сенченков Н.П. Понятия «инклюзивная образовательная среда», «инклюзивное образовательное пространство»: сходства и различия // Человек и образование. 2020. № 4 (65). С. 112–115. DOI: 10.54884/S181570410020485-8. EDN: NXJYRS
2. Степаненко А.Д. Проектирование предметно-пространственной среды для обучающихся с РАС в образовательной организации : выпускная квалификационная работа. Москва, 2022. 63 с. EDN: ATYETT
3. Hehir T., Grindal T., Freeman B., Lamoreau R., Borquaye Y., Burke S. Доказательная база по инклюзивному образованию : пер. с итал. / АНО «Центр проблем аутизма» в рамках проекта «Инклюзивное образование: в согласии с законом» при поддержке Фонда Президентских грантов. 2016. 52 с.

4. Степаненко А.Д., Винокурова Г.А. Проектирование предметно-пространственной среды для обучающихся с расстройствами аутистического спектра в общеобразовательной организации // МАГиЯвгороде: проектирование и развитие городской образовательной инфраструктуры. 2022. С. 247–262. EDN: ATYETT
5. Козорез А., Беспалова А., Гончаренко М., Калабухова А., Лебедева Е., Морозова Е. Ресурсный класс. Опыт организации обучения и внеурочной деятельности детей с аутизмом в общеобразовательной школе. Москва : АНО «Ресурсный класс», 2016. 360 с. ISBN 978-5-90363-065-3.
6. Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю. Опыт зарубежных исследований в области акустических архитектурных решений в школах для детей с аутизмом // Умные композиты в строительстве. 2024. Т. 5. № 4. С. 90–101. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-90-101. EDN: CAIEXD
7. Nichole E.S., Troy Q.B., Bahmei B., Iarocci G., Arzanpour S., Birmingham E. Family Experiences of Decreased Sound Tolerance in ASD // Journal of autism and developmental disorders. 2022. № 52 (9). DOI: 10.1007/s10803-021-05282-4. EDN: SQNGRR
8. Caldas F., Masiero B., Wang L.M. How Classroom Acoustic Conditions May Impact Autistic Students: A Review // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 2023. DOI:10.3397/IN_2022_0438. EDN: FRMDQO
9. Mostafa M. Let them be heard appropriate acoustics for autism special needs school design Arch Cairo // ARCHCairo2006. 2006. 16 p.
10. Стрельникова Е. Ю. Специфика организации образовательной среды для учащихся с ментальными нарушениями // Реабилитация жилого пространства горожанина: материалы XIX Международной научно-практической конф. им. В. Татлина, Пенза, 17 февраля 2023 г. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. 2023. С. 411–413. EDN: PIJHNU
11. Mostafa M. Architecure for autism: Autism ASPECTSS™ in School Design // International Journal of Architectural Research. 2014. № 8 (1). P. 143–158. DOI:10.26687/archnet-ijar
12. Planning and Design Guidelines Primary and Post Primary School Special Educational Needs Accommodation. Tullamore: Planning & Building Unit Department of Education, 2021. 64 p. URL: <https://assets.gov.ie/static/documents/tgd-026-planning-design-guidelines-primary-post-primary-school-specialist-accommodation.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).
13. School Design Guidelines // APS Facilities Design and Construction. February. 2021. URL: https://www.aps.edu/facilities-design-and-construction/documents/design-standards-and-guidelines/HS_Standards.pdf (дата обращения: 12.02.2025).
14. Building Bulletin 102. Designing for disabled children and children with special educational needs Guidance for mainstream and special schools. London : Department for Education, 2008. 199 p. ISBN 9780117039346.
15. Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю. Архитектурно-планировочные решения ресурсных зон в общеобразовательных учреждениях // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023 : сборник докладов IV Национальной научной конференции, Москва, 15 декабря 2023 г. Москва : Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет), 2024. С. 327–332. EDN: MHSVMB
16. Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю. Архитектурный опыт формирования групп помещений ресурсного назначения в школах обучения детей с расстройством аутистического спектра // Умные композиты в строительстве. 2023. Т. 4. № 4. С. 61–74. EDN: XGOMCX

REFERENCES

1. Bliznyuk O.A., Senchenkov N.P. Concepts of Inclusive Educational Environment, Inclusive Educational Space: Similarities and Differences. *Chelovek i obrazovanie*. 2020; 4 (65): 112–115. DOI: 10.54884/S181570410020485-8. EDN: NXJYRS (In Russian)
2. Stepanenko A.D. “Designing a subject-spatial environment for students with ASD in an educational organization”. Graduation Thesis. Moscow. 2022; 63 p. EDN: ATYETT (In Russian)
3. Hehir T., Grindal T., Freeman B., Lamoreaux R., Borquaye Y., Burke S. A Summary of the Evidence on Inclusive Education. Center for Autism Problems in the frame of Inclusive Education: in Accordance with the Law Project supported by the Presidential Grant Foundation, 2016. 52 p. (Russian translation)

4. Stepanenko A.D., Vinokurova G.A. Design of subject-spatial environment for students with autism spectrum disorders in a general education organization. In: MAGiYavgorode: Design and Development of Urban Educational Infrastructure, 2022. Pp. 247–262. EDN: ATYETT (In Russian)
5. Kozorez A.I. Resource Class. Education Experience and Extracurricular Activities of Children with Autism in Secondary Schools. Practical Guide. Moscow: Resursnyi klass, 2016. 360 p. ISBN 978-5-90363-065-3. (In Russian)
6. Chebereva O.N., Strelnikova E.Yu. Foreign Experience in Acoustic Architectural Solutions in Schools for Children with ASD. *Umnye kompozity v stroitel'stve*. 2024; 5 (4): 90–101. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-90-101. EDN: CAIEXD (In Russian)
7. Nichole E.S., Troy Q.B., Bahmei B., Iarocci G., Arzanpour S., Birmingham E. Family Experiences of Decreased Sound Tolerance in ASD. *Journal of Autism and Developmental Disorders*. 2022; 52 (9). DOI: 10.1007/s10803-021-05282-4
8. Caldas F., Masiero B., Wang L.M. How classroom acoustic conditions may impact autistic students: A review. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2023. DOI: 10.3397/IN_2022_0438
9. Mostafa M. Let Them be Heard Appropriate Acoustics for Autism Special Needs School Design Arch Cairo. ARCHCairo2006. 2006.
10. Strelnikova E.Yu. Organization of educational environment for Schoolers with Mental Disorders. In: *Proc. 19th Int. Sci. Conf. 'Rehabilitation of Urban Living Space'*. Penza, 2023. Pp. 411–413. EDN: PIJHHU (In Russian)
11. Mostafa M. Architecture for Autism: Autism ASPECTSS™ in School Design. *International Journal of Architectural Research*. 2014; 8 (1): 143–158. DOI: 10.26687/archnet-ijar
12. Planning and design guidelines primary and post primary school special educational needs accommodation. Tullamore: Planning & Building Unit Department of Education. 2021. 64 p. Available: chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgkclefindmkaj/https://assets.gov.ie/static/documents/tgd-026-planning-design-guidelines-primary-post-primary-school-specialist-accommodation.pdf (accessed February 12, 2025).
13. School design guidelines. APS Facilities Design and Construction. February. 2021. Available: www.aps.edu/facilities-design-and-construction/documents/design-standards-and-guidelines/HS_Standards.pdf (accessed February 12, 2025).
14. Building Bulletin 102. Designing for disabled children and children with special educational needs Guidance for mainstream and special schools. London: Department for Education, 2008. 199 p. ISBN 9780117039346.
15. Chebereva O.N., Strelnikova E.Yu. Architectural and planning solutions for resource zones in educational institutions. In: *Proc. 4th Int. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Construction Industry and Education'*. December 15. National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2024. Pp. 327–332. EDN: MHSVMB (In Russian)
16. Chebereva O.N., Strelnikova E.Yu. Architectural Experience in Forming Groups of Resource-Based Premises at Schools for Teaching Children with Autism Spectrum Disorder. *Umnye kompozity v stroitel'stve*. 2023; 4 (4): 61–74. EDN: XGOMCX (In Russian)

Сведения об авторах

Чеберева Ольга Николаевна, канд. архитектуры, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, rector@nngasu.ru

Стрельникова Елена Юрьевна, соискатель, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, rector@nngasu.ru; преподаватель первой категории, Краснодарский архитектурно-строительный техникум, 350901, г. Краснодар, ул. Российской, 132, kastcoleg@mail.ru

Authors Details

Olga N. Chebereva, PhD, A/Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhny Novgorod, Russia, rector@nngasu.ru

Elena Yu. Strelnikova, Lecturer, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhny Novgorod, Russia; Krasnodar Architectural and Civil Engineering College, 132, Rossiiskaya Str., 350901, Krasnodar, Russia, kastcoleg@mail.ru

Вклад авторов

Чеберева О.Н. – научное руководство, доработка и корректировка текста.

Стрельникова Е.Ю. – концепция исследования, развитие методологии, подбор литературы и источников, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Chebereva O.N. – supervision, writing–review and editing.

Strelnikova E.Yu. – conceptualization, methodology, literature review, writing–original draft preparation.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.05.2025

Submitted for publication 04.05.2025

Одобрена после рецензирования 29.09.2025

Approved after review 29.09.2025

Принята к публикации 29.09.2025

Accepted for publication 29.09.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 90–102.

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 (6): 90–102.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.4:728.2(460)

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-90-102

EDN: JBABYF

АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНОГО ЖИЛИЩА В ИСПАНИИ

**Евгений Леонидович Огиенко¹, Игорь Николаевич Гарькин¹,
Александр Альбертович Колесников^{1,2}**

¹*Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,
г. Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена растущей потребностью в качественном социальном жилище для уязвимых категорий населения в условиях урбанизации. Испанский опыт проектирования муниципального жилища представляет особый интерес благодаря комплексному подходу, сочетающему доступность, комфорт и интеграцию в городскую среду.

Цель работы – выявить ключевые принципы организации социального жилища муниципальной аренды в Испании на основе анализа реализованных проектов.

Материалы и методы исследования включают анализ четырех жилых комплексов в Барселоне, Мадриде и Витории. Применялись методы сравнительного анализа архитектурно-планировочных решений, классификации по типам пространственной организации, оценки интеграции социальной инфраструктуры и принципов формирования жилой среды.

Результаты исследования показали, что испанские проекты социального жилища характеризуются разнообразием планировочных структур с преобладанием секционной организации; обязательным включением объектов обслуживания, торговли или работы; расположением в центральных районах с развитой инфраструктурой; применением адаптивных планировочных решений для разных категорий жильцов; высокими стандартами энергоэффективности и экологичности.

Анализ показал, что испанский опыт проектирования социального жилища характеризуется вниманием к энергоэффективности, гибкости планировочных решений и созданию полноценной жилой среды, не уступающей по качеству коммерческому жилью. Особую ценность представляет принцип доступности жилища, основанный не на уровне дохода, а на жизненной ситуации потенциальных жильцов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке концепций социального жилища в других странах, в том числе с учетом необходимости адаптации к местным градостроительным условиям и социальным требованиям.

Ключевые слова: социальное жилище, муниципальная аренда, инфраструктура, адаптивные решения, уязвимые категории населения

Для цитирования: Огиенко Е.Л., Гарькин И.Н., Колесников А.А. Архитектурные решения муниципального жилища в Испании // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 90–102. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-90-102. EDN: JBABYF

ORIGINAL ARTICLE

**ARCHITECTURAL SOLUTIONS
FOR MUNICIPAL HOUSING IN SPAIN****Evgenii L. Ogienko¹, Igor' N. Gar'kin¹, Aleksandr A. Kolesnikov^{1,2}**¹*Peoples' Friendship University of Russia Named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia*²*The National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

Abstract. The relevance of the study is determined by the growing need for high-quality social housing for vulnerable categories of the population in terms of urbanization. The Spanish experience in designing municipal houses, is of particular interest due to its integrated approach that combines accessibility, comfort and integration into the urban environment.

Purpose: The purpose of the study is to identify the key principles of social housing for municipal rent in Spain based on the analysis of completed projects.

Methodology: The analysis of four residential complexes in Barcelona, Madrid and Vitoria; comparative analysis of architectural planning solutions, type classification of the spatial organization; assessment of the integration of social infrastructure and principles of formation in the living environment.

Research findings: It is shown that social housing in Spain is characterized by a variety of planning structures with a predominance of sectional organization; mandatory inclusion of service, trade or work facilities; location in central areas with the developed infrastructure; adaptive planning solutions for different categories of residents; high standards of energy efficiency and environmental friendliness. It is shown that the Spanish experience in design of social houses is characterized by the energy efficiency, flexibility of planning solutions and creation of a full-fledged living environment that is not inferior in quality to commercial housing.

Value: Of particular value is the principle of housing affordability, based not on the income level, but on the life situation of potential residents. The results obtained can be used to develop social housing concepts in other countries, including the adaptation to local conditions and social requirements.

Keywords: social housing, municipal rent, infrastructure, adaptive solutions, vulnerable categories, population

For citation: Ogienko E.L., Gar'kin I.N., Kolesnikov A.A. Architectural Solutions for Municipal Housing in Spain. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 90–102. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-90-102. EDN: JBABYF

Введение

Современный город сталкивается с парадоксом: при общем росте жилищного фонда многие жители – молодые специалисты, начинающие семьи и пожилые люди – оказываются исключены из рынка недвижимости. В этих условиях испанский опыт социального жилища муниципальной аренды предлагает модель, где качество среды не зависит от платежеспособности. Архитектура здесь становится социальным лифтом, обеспечивая не просто крышу над головой, но достойные условия для разных форм существования [1].

Муниципальное жилище¹ создается для тех, кто особенно уязвим на рынке недвижимости: молодых специалистов, начинающих семей, пожилых

¹ Council housing – муниципальное жилище: 1) принадлежащий городскому совету (муниципалитету) жилищный фонд, сдаваемый в аренду наименее обеспеченным категориям населения

людей, переживающих сокращение доходов. Важно, что право на такое жилище определяется не уровнем зарплаты, а жизненной ситуацией (категории, которые нужно поддерживать вне зависимости от уровня дохода). Это принципиально иной подход, в котором крыша над головой рассматривается не как товар, а как базовое право горожанина.

Архитектура муниципального жилища в Испании в примерах, приведенных ниже, ориентируется на поддержку одиночек и пар без детей, индивидуальной (семейной формы) проживания [2, 3, 4]. Здесь важны не только количество комнат, но и адаптивные² решения [5, 6]. Продуманные общественные пространства – детские площадки во дворах, клубы для подростков, зоны отдыха для пожилых и т. д.

Ключевое преимущество муниципальных комплексов – их расположение в сложившейся городской среде с развитой инфраструктурой. Все необходимые объекты находятся в центральной части города, что делает жилье полноценной средой обитания. При этом сами жилые комплексы часто включают в себя социальные объекты и являются объектами смешанного использования, становясь центрами притяжения для всего района [7, 8, 9].

Такой подход к муниципальному жилищу создает не просто места для проживания, а полноценные сообщества, где человек чувствует себя защищенным и включенными в городскую жизнь, независимо от своего экономического статуса [10, 11, 12].

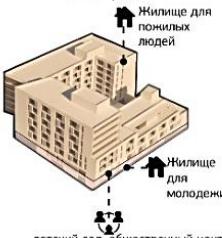
Архитектурные решения муниципального жилища в Испании

В жилом комплексе **154 Rental Social Housing and Public Building for the Barcelona Municipal Housing** (рис. 1), спроектированном архитектурным бюро ONL Arquitectura в 2012 г., гармонично сочетаются доступное социальное жилище³, общественные функции и продуманная организация пространства. Расположенный на участке площадью 0,7 га, этот проект включает 154 квартиры общей площадью около 9000 кв. м и ориентирован на создание комфортной среды для разных поколений: молодых и пожилых людей. Проект представляет собой коридорный объемно-пространственный тип дома.

с частичным субсидированием арендной платы; 2) жилищное строительство для этих целей = = municipal housing

² Свойство архитектуры адаптироваться со временем. Жилище может изменяться со временем, обладать адаптивными свойствами, можно выделить два основных направления в развитии адаптируемого жилища: адаптация жилища за счет эволюционных преобразований, предполагающая развитие жилища, его переоборудование и расширение («растущее жилище», «открытое здание»); адаптация жилища за счет модификационных преобразований, когда все возможные варианты изменений предусмотрены изначально проектом и реализуются в пределах заложенной программы (жилище с трансформируемым пространством, «поливалентное жилище») – Анисимов Л.Ю. Принципы формирования архитектуры адаптируемого жилища: диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры. 2009. С. 210. URL: <https://viewer.rsl.ru/tu/rsl01003487897?page=1&rotate=0&theme=white>

³ Социальное жилище – social housing – жилище, предоставляемое обществом менее обеспеченным своим членам по доступной им цене за счет дотирования части жилищных расходов из средств государственного (федерального, муниципального) бюджета; главные отличия s.h. от рыночного: 1) предоставляется по цене, не определяемой соображениями извлечения прибыли; 2) распределяется административно согласно принятой концепции потребности; 3) на количества, качество и сроки предоставления s.h. существенное влияние оказывают политические соображения (Harloe, M., 1988); [см. также. social housing categories, social housing subcategories, social rented housing, social owneroccupied housing].

№ 1 154 Rental Social Housing And Public Building For The Barcelona Municipal Housing, арх. ONL Arquitectura, Барселона, Испания, 2012	№ 2 Vallecas Public Housing, арх. Estudio. Entresitio, Мадрид, Испания, 2009
<p>4 Уровень. Архитектурно-художественный</p>  <p>Территория: ок. 0,7 Га Всего квартир: 154 Общая площадь: нет информации, ок. 9000 кв.м. Дополнительные характеристики: два типа жилья, построенных с одинаковыми размерами и организацией: благодаря ряду отличительных элементов приближаются к чувствительности или образу жизни молодых и пожилых людей. Предполагается, что пожилые люди будут проводить большие времени дома и в здании, пользуясь общественными пространствами.</p>	<p>Территория: 0,4 Га Всего квартир: 132 Общая площадь: ок. 9300 кв.м. Дополнительные характеристики: квартиры предназначены в качестве первого жилья для молодежи (для одиноких и пар). Архитектурное решение при условии соблюдения "экономических" параметров участка: максимальные площади для застройки и количества жилых помещений, и всегда учитывая, что это жилой комплекс социального назначения.</p> 
<p>3 Уровень. Объемно-пространственный</p>  <p>Изометрия Жилище для пожилых людей Жилище для молодежи детский сад, общественный центр</p> <p>Особенности архитектурных решений: комплекс состоит из двух отдельных зданий, разделенных внутренним двором, расположенным на самом видном месте: на углу двух главных улиц. В здании: детский сад, общественный центр и два подземных этажа для арендаемых парковочных мест. Помещение кухни-столовой-гостиной сделано единым, более универсальным и динамичным, что облегчает расстановку мебели различных типов и предоставляет более широкий спектр возможностей для использования. Два подземных этажа для арендаемых парковочных мест.</p>	<p>Изометрия Жилище для молодежи Коммерческие и офисные помещения</p> <p>Особенности архитектурных решений: 22-этажное здание имеет две башни разной высоты. В блоке 132 квартиры с одной и двумя спальнями, а также торговые помещения на первом этаже. Двухуровневые квартиры в комплексе. Коммерческие и офисные помещения на первом этаже. Этот проект является результатом конкурса, проведенного Муниципальным жилищным агентством Мадрида в конце 2003 года. 132 квартиры с одной и двумя спальнями предназначены в качестве первого жилья для молодежи.</p>
<p>2 Уровень. Архитектурно-планировочный</p>  <p>План квартиры План 1 этажа План 2 этажа План 3 этажа План 4 этажа Муниципальная аренда.</p>	<p>План квартиры двухуровневые квартиры План 1 этажа План 2 этажа План 3 этажа План 4 этажа Муниципальная аренда.</p>
<p>1 Уровень. Архитектурно-градостроительный</p>  <p>Модель центральная связанные</p> <p>Минимальное количество учреждений обслуживания в комплексе. Жилой комплекс зависит от расположения инфраструктуры в городе (магазины, образовательные учреждения, культуры, отдыха и досуга).</p> <p>URL: https://www.arquitecturacatalana.cat/en/works/154-habitatges-dotacionals-i-equipaments-dr-torrent</p>	<p>Модель центральная связанные</p>  <p>Минимальное количество учреждений обслуживания в комплексе. Жилой комплекс зависит от расположения инфраструктуры в городе (магазины, образовательные учреждения, культуры, отдыха и досуга).</p> <p>URL: https://www.metalocus.es/en/news/vallecas-public-housing-estudioentresitio</p>

Rис. 1. Проекты муниципального жилища в Барселоне и Вальекасе. Составлено авторами на основе ArchDaily⁴

Fig. 1. Projects of municipal housing facilities in Barcelona and Vallecas. Composed by the authors using ArchDaily

⁴ URL: https://www.archdaily.com/299690/154-rental-social-housing-and-public-building-for-the-barcelona-municipal-housing-onl-arquitectura?ad_source=search&ad_medium=projects_tab; https://www.archdaily.com/76706/vallecas-public-housing-estudio-entresitio?ad_source=search&ad_medium=projects_tab

Два здания, образующие комплекс, разделены внутренним двором, который занимает ключевое место на углу двух главных улиц, формируя открытое и приветливое общественное пространство. Архитекторы предусмотрели два типа квартир с одинаковой планировкой, но с деталями, адаптированными под потребности молодых жителей и пожилых людей. Для старшего поколения, которое проводит больше времени дома, важны удобство и доступность общих зон, в то время как молодежь ценит гибкость и возможность пространственного расширения или изменения планировок квартир [13].

Жилой комплекс представляет собой жилище смешанного использования⁵. Особенностью проекта стало объединение жилой функции с общественной инфраструктурой. В здании разместились детский сад и общественный центр, что способствует активному взаимодействию жителей. Два подземных этажа с парковочными местами решают проблему хранения автомобилей в условиях плотной городской застройки [13, 14, 15]. Жилой комплекс расположен в центральной части города в уже сложившейся застройке с необходимой инфраструктурой [16].

Планировка квартир продумана до мелочей: единое пространство кухни, столовой и гостиной делает интерьер универсальным и позволяет легко адаптировать его под разные нужды. Такой подход не только повышает комфорт, но и дает жителям свободу в организации быта.

Этот проект – пример того, как социальное жилище может быть не просто экономичным, но и качественным, современным. Архитекторам удалось создать среду, которая учитывает разнообразие состава жителей и при этом остается эстетически выразительной. Жилой комплекс в Барселоне доказывает, что даже в рамках бюджетных решений можно достичь архитектурной гармонии и продуманной организации жизни.

В мадридском районе Вальекас, где современная архитектура постепенно преобразует городской ландшафт, архитектурное бюро Estudio.Entresitio реализовало новаторский проект социального жилища. 22-этажный комплекс **Vallecas Public Housing** (рис. 1), появившийся в 2009 г. в результате победы в конкурсе Муниципального жилищного агентства Мадрида, предлагает оригинальное решение проблемы доступного жилища для молодежи. На компактном участке площадью всего 0,4 га архитекторам удалось разместить 132 квартиры общей площадью около 9300 кв. м, создав при этом узнаваемый архитектурный акцент района. Проект представляет собой секционно-коридорный объемно-пространственный тип дома.

Две разновысокие башни, составляющие комплекс, демонстрируют экономически эффективный подход к плотной городской застройке. Проект максимально использует ограниченное пространство, предлагая молодым жителям – одиночкам и парам без детей – комфортное первое жилище с одной или двумя спальнями. Особенностью стали двухуровневые квартиры, которые при

⁵ Жилище смешанного использования – mixed-use housing – общественно-жилой комплекс многоцелевого назначения, объединяющий жилище с обслуживанием, напр.: жилище для престарелых с гериатрическим центром, жилище для бездомных с центром профессиональной переподготовки, жилище для осколочных семей и одиночек с детским садом (Davis, S., 1995). Кияненко К.В. Современное рыночное жилище: архитектурная типология, социология, экономика и менеджмент: краткий англо-русский терминологический словарь-справочник. Вологда: ВоГТУ, 1999. 93 с.

скромных площадях создают ощущение простора и дают возможность зонирования пространства.

Функциональность комплекса подчеркивается продуманным распределением помещений: первые этажи отведены под коммерческие и офисные пространства, что оживляет окружение и создает инфраструктуру для жильцов. Такой подход превращает высотный комплекс в полноценный мини-квартал, где есть все необходимое для жизни.

Несмотря на строгие бюджетные рамки и требования к максимальной плотности застройки, Estudio.Entresitio создали не просто типовое жилище, а выразительный архитектурный объект. Башни разной высоты формируют динамичный силуэт, а продуманная планировка доказывает, что экономичное жилище может быть комфортным и современным. Vallecas Public Housing стал удачным примером того, как социальная архитектура может отвечать запросам молодого поколения, предлагая не только доступное жилище, но и качественную среду для жизни в большом городе.

На окраине Мадрида, где городские улицы встречаются с холмистым ландшафтом, архитектурное бюро Coco Arquitectos реализовало смелый эксперимент в области социального жилища. Проект **168 Social Housing** (рис. 2), удостоенный первого приза в конкурсе Муниципального жилищного агентства Мадрида, переосмысливает традиционные подходы к доступному жилищу, предлагая инновационное пространственное решение для современных горожан. Проект представляет собой секционный объемно-пространственный тип дома.

Расположенный на участке площадью 1 га с выраженным уклоном, комплекс демонстрирует впечатляющую адаптацию к сложному рельефу. Длинное, вытянутое здание, напоминающее тонкую ленту, вмещает 168 компактных квартир общей площадью около 20 000 кв. м, предназначенных преимущественно для одиноких и пар без детей. Каждая квартира, состоящая из одной или двух спален, получает уникальную двустороннюю ориентацию – с одной стороны открывается вид на городскую панораму, с другой – на уединенный частный сад, создающий ощущение оазиса среди городской застройки.

Главной архитектурной находкой проекта стали трансформируемые внутренние пространства и новаторские «плавающие» комнаты, выступающие за пределы основного фасада. Эти своеобразные архитектурные балконы не только придают зданию динамичный современный облик, но и выполняют важную функциональную роль. Они служат многофункциональными зонами, которые жильцы могут адаптировать под свои нужды – от домашнего офиса до зимнего сада или места для отдыха. Особое внимание было уделено гибкости планировок: внутренние помещения можно легко трансформировать, подстраивая под изменяющиеся потребности жильцов [5, 15].

Важной особенностью проекта стала тщательно продуманная связь между приватным и общественным пространством. В каждом жилом блоке предусмотрена комната с двусторонним остеклением, одновременно обращенная и к городу, и к саду, что создает эффект визуального простора и связи с окружающей средой. Общий сад, скрытый от уличного шума, становится местом для неформального общения и отдыха, компенсируя компактные размеры самих квартир. Жилой комплекс располагается в центральной части города в уже сложившейся застройке с необходимой инфраструктурой.

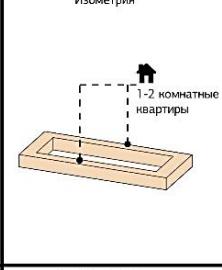
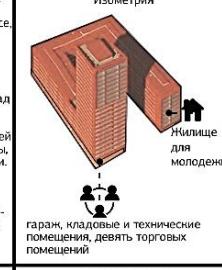
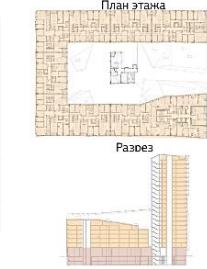
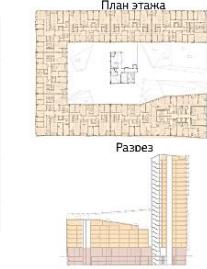
№ 3	168 Social Housing in Madrid, Spain, арх. Coco Arquitectos, Мадрид, Испания, 2010	№ 4	242 Social Housing Units in Salburúa, арх. ACXT, Витория, Испания, 2012
4 Уровень. Архитектурно-художественный	 <p>Территория: ок. 1 Га Всего квартир: 168 Общая площадь: ок. 20000 кв.м. Дополнительные характеристики: жилище для одиноких и пар для создания новой концепции жизни. Этот проект является результатом получения первого приза в конкурсе, проводимом Муниципальным агентством Мадрида, на строительство 168 социальных домов. Участок с сильным уклоном был расположен на самой окраине города.</p>	 <p>Территория: ок. 2 Га Всего квартир: 242 Общая площадь: ок. 38670 кв.м. Дополнительные характеристики: жилище предназначено для студентов. Квартиры, субсидируемые муниципалитетом, что является выражением заботы об обществе, всеобщего благосостояния и его приверженности праву граждан на достойное жилье, независимо от экономического уровня людей, которых в них живут. Дома построены с целью обеспечения превосходных условий проникания, энергоэффективности и экономии мест общего пользования, уделяя приоритетное внимание двойной ориентации и предлагая наилучший вид на окружающую среду.</p>	
3 Уровень. Объемно-пространственный	<p>Изометрия</p>  <p>Особенности архитектурных решений: проект является результатом получения первого приза в конкурсе, проводимом Муниципальным агентством Мадрида. Формы внутренних помещений можно изменять, в то время как внешние контуры здания остаются неизменными. Благодаря различным высотам фасадов и обеспечению гибкого пространства, достаточно большое, чтобы вместить различные виды домашней деятельности. Небольшие квартиры, всего с одной или двумя спальнями. Планировка здания представляет собой тонкую полосу с узкими квартирами, выходящими на две стороны с одной стороны - город, с другой - частный сад. В каждом блоке есть комната, которая выходит на обе стороны.</p>	<p>Изометрия</p>  <p>Особенности архитектурных решений: башня высотой в 21 этаж и непрерывный U-образным блоком различной высоты от четырех до сорока этажей. На каждом этаже здания расположены помещения. Для цокольных этажей занимают весь участок и вмещают гаражи, склады, мастерские и различные коммерческие помещения, а оставшаяся площадь используется под муниципальное жилье. Дома построены с целью обеспечения превосходных условий проникания, энергоэффективности и экономии мест общего пользования, уделяя приоритетное внимание двойной ориентации и предлагая наилучший вид на окружющую среду.</p>	
2 Уровень. Архитектурно-планировочный	<p>План квартиры</p>  <p>Муниципальная аренда.</p>	<p>План этажа</p>  <p>План квартиры</p>  <p>Муниципальная аренда.</p>	<p>План этажа</p>  <p>Разрез</p> 
1 Уровень. Архитектурно-градостроительный	<p>Модель центральная связанный</p>  <p>Минимальное количество учреждений обслуживания в комплексе. Жилой комплекс зависит от расположения инфраструктуры в городе (магазины, образовательные учреждения, культуры, отдых и досуг).</p>	<p>Модель центральная связанный</p>  <p>Минимальное количество учреждений обслуживания в комплексе. Жилой комплекс зависит от расположения инфраструктуры в городе (магазины, образовательные учреждения, культуры, отдых и досуг).</p>	

Рис. 2. Проекты муниципального жилища в Мадриде и Витории. Составлено авторами на основе ArchDaily⁶

Fig. 2. Projects of municipal housing facilities in Madrid and Vitoria. Composed by the authors using ArchDaily

Этот проект Coco Arquitectos доказывает, что социальное жилище может быть не только доступным, но и архитектурно выразительным, комфорным

⁶ URL: <https://www.archdaily.com/104934/social-housing-in-carabanchel-coco-arquitectos>; <https://www.metalocus.es/en/news/242-social-housing-units>

и адаптивным. Используя ограниченный бюджет максимально эффективно, архитекторам удалось создать среду, которая учитывает потребности современных горожан, предлагая им не просто крышу над головой, а качественное жилое пространство с индивидуальным характером. 168 Social Housing в Мадриде становится примером того, как инновационный подход к проектированию может преобразовать саму концепцию доступного жилища, делая его одновременно функциональным, эстетичным и отвечающим вызовам современной архитектуры.

В зеленом районе Сальбуруа г. Витория архитектурная студия ACXT создала пример современного социального жилища для студентов **242 Social Housing Units in Salburúa** (рис. 2). Реализованный в 2012 г. комплекс из 242 муниципальных квартир общей площадью около 9000 кв. м на участке в 2 га воплощает принципы доступного, но качественного жилища, соответствующего идеалам общества всеобщего благосостояния. Этот проект демонстрирует возможности совмещения экономической эффективности, энергосберегающих технологий и комфортных условий для жизни молодого поколения. Проект представляет собой секционный объемно-пространственный тип дома.

Архитектурный ансамбль состоит из двух выразительных элементов: 21-этажной башни, ставшей архитектурной доминантой района, и U-образного блока переменной этажности (от 4 до 7 этажей), который формирует защищенное внутреннее пространство. На первых этажах расположено девять торговых помещений, оживляющих общественную жизнь комплекса, а два подземных уровня занимают просторный гараж, кладовые и технические помещения, освобождая наземное пространство для комфортного проживания. Жилой комплекс находится в центральной части города в уже сложившейся застройке с необходимой инфраструктурой.

Особое внимание уделено энергоэффективности и экологичности здания – от тщательно продуманной теплоизоляции до ориентации квартир, каждая из которых имеет двойную направленность. Это позволяет не только экономить энергию, но и обеспечивает жильцов оптимальным естественным освещением и прекрасными видами на окружающий ландшафт. Планировка квартир максимально функциональна: компактные, но продуманные пространства содержат все необходимое для комфортной жизни студентов, экономя при этом площадь общих зон.

Проект ACXT в Сальбуруа – это пример создания целостной жилой среды, где учтены различные аспекты современной жизни. Благодаря сочетанию социальной направленности, инновационных строительных решений и выразительных архитектурных решений, комплекс демонстрирует, как муниципальное жилище может соответствовать высоким стандартам качества, оставаясь доступным для различных слоев населения. Проживающие в нем студенты получают не просто субсидируемое жилище, а полноценное пространство для жизни, учебы и развития. Этот проект подтверждает возможность воплощения права каждого гражданина на достойные жилищные условия независимо от экономического статуса [4, 14, 15].

Сводная информация по анализу международного опыта кооперативного жилища приведена в таблице. Она включает несколько ключевых категорий, таких как объемно-пространственный тип дома, демографические типы семей, ха-

рактер занятости и др. Однако структура таблицы кажется неполной или содержит повторяющиеся элементы (например, «Размещение в городе» и «Формы проживания 1» и т. д.). Оранжевый цвет в таблице используется для визуального обозначения соответствия между объектом анализа (например, тип дома, формы проживания), конкретными характеристиками (наличие инфраструктуры, тип аренды и т. д.).

Анализ международного опыта International experience analysis

		Объемно-пространственный тип дома			Наличие общественных функций		Размещение в городе		Формы проживания 1		Демографические типы семей		Характер занятости																
#		Индивидуальный жилой дом	Блокированный	Многоквартирный	Секционный	Коридорный	Галерейный	Аркулярный	Обслуговивание	Работа	Досуг	Торговля	Центр (наличие развитой инфраструктуры)	Периодичность (отсутствие инфраструктуры)	Университетский кампус	Семейное	Коллективное	Коммунальное	Смешанное	Одиночки	Пара без детей	Семейная пара с детьми	Осколочные семьи	Неродственные домохозяйства	Студенты	Аспиранты	Молодые и предпенсионные рабочие	Молодые и предпенсионные рабочие	Берработная молодежь
1 тип	35																												
	36																												
	37																												
	38																												

Окончание таблицы
End of table

		Состояние здоровья		Формы проживания 2		Форма собственности и предоставления				Уровень дохода									
#		Здоровые	Население с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ)	Временное	Постоянное	Смешанное	Муниципальная аренда	Государственная аренда	Ведомственная аренда	Частная субсидируемая аренда	Кооперативная и коллективная собственность	Кондоминиум	Частная собственность	Смешанная	Полностью экономически независимые	Экономически несамостоятельные, но оплачивают	Натурализированные, которые не зависят от ур. дохода	Полностью экономически самостоятельные	Смешанные по уровню дохода
1 тип	35																		
	36																		
	37																		
	38																		

Анализ четырех объектов социального жилища выявил ключевые особенности их организации и функционирования. Все рассмотренные объекты расположены в центральных городских районах, что обеспечивает их жителям доступ к необходимой инфраструктуре и транспортной сети. По планировочной структуре объекты распределяются следующим образом: один представляет коридорную систему, один – секционно-коридорную и два выполнены по секционной схеме. Такое распределение демонстрирует преобладание секционной структуры как наиболее универсального решения для постоянного проживания, в то время как коридорные и гибридные системы применяются в более специализированных случаях.

Функциональное наполнение объектов варьируется: в одном случае сочетаются обслуживание и работа, в другом – работа и торговля, в третьем – обслуживание и торговля. Это разнообразие свидетельствует о гибком подходе к формированию жилой среды, адаптированной под различные потребности жильцов. При этом отсутствие единого стандарта в организации инфраструктуры указывает на необходимость разработки более системных решений в этой области.

Все объекты предназначены для здорового населения, для постоянного проживания и ориентированы на одиночек и пар без детей, причем один из объектов специально предназначен для студентов. Такая направленность позволяет сделать вывод о том, что данное жилище выполняет социальную функцию поддержки определенных категорий граждан, нуждающихся в улучшении жилищных условий независимо от уровня их доходов. Однако анализ выявил и некоторые ограничения. В частности, отсутствуют решения для семей с детьми. Кроме того, наблюдается разрозненность в организации сопутствующей инфраструктуры, что снижает эффективность использования таких объектов.

Заключение

Ключевая социальная идея муниципального жилища заключается в предоставлении доступного жилья для категорий населения, которые в нем нуждаются, и не зависит от уровня дохода проживающих. Это принципиально меняет традиционную парадигму – жилье рассматривается как базовое право, а не как товар. Испанские архитекторы переосмысливают социальное жилище как лабораторию новых отношений между человеком и городской средой. Главный итог из рассмотренных проектов – муниципальное жилище может и должно быть не «упрощенной версией» рынка, а альтернативной моделью, где качество среды определяется не бюджетом, а продуманностью каждой детали. Архитектурная выразительность таких проектов опровергает стереотипы о «бюджетном» жилище. Как правило, такие здания имеют коридорную секционную планировочную структуру и могут включать различные общественные функции: обслуживание, досуг, торговлю или рабочую инфраструктуру.

Представленные проекты демонстрируют, как архитектура адаптируется под потребности разных групп населения. Для молодежи – это гибкие планировки с трансформируемыми пространствами (проект 168 Social Housing в Мадриде), для разновозрастных сообществ – интеграция общественных функций (проект 154 Rental в Барселоне), для студентов – энергоэффективные решения с развитой инфраструктурой (проект 242 Social Housing в Витории). Отказ от шаблонных планировок в пользу адаптивных решений позволяет одним и тем же квартирам служить разным сценариям жизни человека в разные этапы его жизни.

Общим принципом всех проектов является расположение в сложившейся городской среде с доступом к транспорту, школам, поликлиникам и магазинам. Особое внимание сосредоточено на энергоэффективности, экономии средств и компактной застройке с максимальным использованием территории, в рамках которых работает застройщик. Социальное жилище не должно рассматриваться как упрощенная версия коммерческого. Это самостоятельная категория архитектуры, где качество среды определяется не бюджетом, а глубоким пони-

манием потребностей жителей и тщательной проработкой каждого элемента – от планировки квартир до организации общественных пространств.

Испанский опыт доказывает, что доступное жилище может и должно быть качественным, адаптивным, энергоэффективным и архитектурно выразительным. Муниципальное жилище становится не просто местом проживания, а инструментом социальной интеграции и повышения качества жизни.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Огненко Е.Л.* Типология социального жилища для молодежи в Европе, Америке, Азии в ХХ–XXI веках // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 3. С. 176–184. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-176-184. EDN: BYJZXG
2. *The state of housing in Europe.* 2021 // Housing Europe: Brussels, March 2021. Р. 39–113. URL: chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgkclclefindmka/jhttps://www.housingeurope.eu/wp-content/uploads/2024/11/The_State_of_Housing_in_the_EU_2021_digital.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
3. Кутузов В.В. Воспроизведение жилья в условиях социально-ориентированной рыночной экономики: основные положения, комментарии. Москва : ЦНИИЭП жилища, 1994. 290 с. (Жилье для всех и рынок).
4. Кияненко К.В. Современное рыночное жилище: архитектурная типология, социология, экономика и менеджмент. Краткий англо-русский терминологический словарь-справочник. Вологда : ВоГТУ, 1999. 93 с. ISBN 5-87851-104-5.
5. *Огненко Е.Л.* Отечественная и зарубежная типология жилья для малообеспеченных слоев населения // Архитектура и современные информационные технологии. 2021. № 2 (55). С. 143–154. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-2-143-154. EDN: SRSLOC
6. *Анисимов Л.Ю.* Принципы формирования архитектуры адаптируемого жилища : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры. 2009. 210 с. URL: https://vierwer.rsl.ru/ru/rsl01003487897?page=1&rotate=0&theme=white
7. *Braae E., Steiner H., Riesto S., Glaser M. et al.* Examining the publicness of spaces on European social housing estates: a position paper // Architectural Research Quarterly. 2023. V. 27. № 2. Р. 143–157. DOI: 10.1017/s1359135523000155. EDN: SRTTPP
8. *Davis S.* The Architecture of Affordable Housing. Publisher. University of California Press, Ltd., 1995. 220 с. ISBN 978-0520208858.
9. *Dalla Caneva A., Bertolazzi A.* De vliegsevel in the Netherlands between construction and representation. Past and present-day experiences in social housing // Rivista Tema. 2024. V. 10. № 1. DOI: 10.30682/tema100009. EDN: WHEYDB
10. *Cieśla A.* Local housing strategies in Poland as a tool to develop social and affordable housing: barriers for development // Research Papers in Economics and Finance. 2023. V. 7. № 2. DOI: 10.18559/ref.2023.2.1080. EDN: UDURSN
11. *Cortés-Urra V., Ersoy A., Czischke D. et al.* The potential of collaborative housing to tackle the social deficit of housing: the Chilean case // Journal of Housing and the Built Environment. 2024. № 39. Р. 697–725. DOI: 10.1007/s10901-023-10094-2
12. *Lee U-hui, Park Kyeong-jin, Oh Jung-Seok.* Social Relations Satisfaction of Public Rental Housing after COVID-19 // Korea Real Estate Industry Society. 2023. № 135. Р. 24. DOI: 10.56409/kreis.2023.6.2.26
13. *Lopes F., Figueiredo L., Gil J., Trigueiro E.* Evaluating the impact of social housing policies: Measuring accessibility changes when individuals move to social housing projects // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2023. DOI: 10.1177/23998083231218774. EDN: IVEDNH
14. *Novy A., Baumgartner B., Grabow S., Plank L., Volmary H.* Greening Red Vienna : lessons for social-ecological housing provision. Sustainability // Science, Practice and Policy. 2024. V. 20. № 1. DOI: 10.1080/15487733.2024.2312674. EDN: EUDGVC
15. *Rahmanita P., Wiranegara H. W., Supriatna Y.* Effect of various housing patterns on social cohesion // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. V. 1263. № 1. Р. 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/1263/1/012011. EDN: MXCFUW

16. Кияненко К.В. Разработка социально-функциональной модели общественно-жилого комплекса. 2-е изд., перераб. и доп. Вологда : Вологодский государственный технический университет, 2010. 24 с. EDN: XVUIPJ

REFERENCES

1. Ogienko E. Typology of Social Housing for Youth in Europe, America and Asia in the 20th-21st centuries. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2024; (3): 176–184. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-176-184. EDN: BYJZXG (In Russian)
2. The state of housing in Europe 2021. Pp. 39-113. Available: www.housingeurope.eu/wp-content/uploads/2024/11/The_State_of_Housing_in_the_EU_2021_digital.pdf (accessed June 25, 2025).
3. Kutuzov V.V. Housing Reproduction in Socially Oriented Market Economy: Key Provisions, Comments. Moscow: TsNIIIEP zhilishcha, 1994. 290 p. (In Russian)
4. Kiyanenko K.V. Contemporary Market Housing: Architectural Typology, Sociology, Economics, and Management: A concise English-Russian terminology reference dictionary. Vologda: Vologda State Technical University, 2010. 8 p. (In Russian)
5. Ogienko E.L. Russian and Foreign Typology of Housing for Low-Income Groups. *Arkhitektura i sovremennoye informatsionnye tekhnologii*. 2021; 2 (55): 143–154. Available: https://marhi.ru/AMIT/2021/2kvart21/PDF/10_ogienko.pdf (In Russian)
6. Anisimov L.Yu. "Principles of designing adaptable housing architecture". PhD Thesis. 2009. 210 p. Available: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003487897?page=1&rotate=0&theme=white> (In Russian)
7. Braae E., Steiner H., Riesto S., Glaser M., et al. Examining the Publicness of Spaces on European Social Housing Estates: A Position Paper. *Architectural Research Quarterly*. 2023; 27 (2): 143–157. DOI: 10.1017/s1359135523000155. EDN: SRTTPP
8. Davis S. The Architecture of Affordable Housing. University of California Press Ltd., 1995. 220 p. ISBN 978-0520208858.
9. Dalla Caneva A., Bertolazzi A. De vliesgevel in the Netherlands between Construction and Representation. *Past and Present-Day Experiences in Social Housing. Rivista Tema*. 2024; 10 (1). DOI: 10.30682/tema100009. EDN: WHEYDB. Available: https://rivistatema.com/sito/wp-content/uploads/2024/02/TEMA-D-23-00001R2_20230120_OK.pdf
10. Cieśla A. Local Housing Strategies in Poland as a Tool to Develop Social and Affordable Housing: Barriers for Development. *Research Papers in Economics and Finance*. 2023; 7 (2). DOI: 10.18559/ref.2023.2.1080. EDN: UDURSN
11. Cortés-Urra V., Ersoy A., Czischke D., et al. The Potential of Collaborative Housing to Tackle the Social Deficit of Housing: The Chilean Case. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2024. 29 p. DOI: 10.1007/s10901-023-10094-2
12. Lee U-hui, Park Kyeong-jin, Oh Jung-Seok. Social Relations Satisfaction of Public Rental Housing after COVID-19. *Korea Real Estate Industry Society*. 2023; (135): 24. DOI: 10.56409/kreis.2023.6.2.26
13. Lopes F., Figueiredo, L., Gil J., Trigueiro E. Evaluating the Impact of Social Housing Policies: Measuring Accessibility Changes when Individuals Move to Social Housing Projects. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2023. P. 20. DOI: 10.1177/23998083231218774. EDN: IVEDNH
14. Novy A., Baumgartner B., Grabow S., Plank L., Volmary H. Greening Red Vienna: Lessons for Social-Ecological Housing Provision. *Sustainability. Science, Practice and Policy*. 2024; 20 (1). DOI: 10.1080/15487733.2024.2312674. EDN: EUDGVC
15. Rahmanita P., Wiranegara H. W., Supriatna Y. Effect of Various Housing Patterns on Social Cohesion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023; 1263 (1): 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/1263/1/012011. EDN: MXCFUW
16. Kiyanenko K.V. Development of a Socio-Functional Model for a Public-Residential Complex. 2nd edn. Vologda: VSU, 2010. 24 p. EDN: XVUIPJ (In Russian)

Сведения об авторах

Огienko Евгений Леонидович, ассистент кафедры, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, tengue@list.ru

Гар'кін Ігорь Николаевич, канд. техн. наук, канд. ист. наук, зав. кафедрой, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, igor_garkin@mail.ru

Колесников Александр Альбертович, канд. архитектуры, доцент, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, arka-92@mail.ru

Authors Details

Evgenii L. Ogienko, Assistant Lecturer, Peoples' Friendship University of Russia Named after Patrice Lumumba, 6, Miklukho-Maklaya Str., 117198, Moscow, Russia, tengue@list.ru

Igor' N. Gar'kin, PhD, Head of the Department, Peoples' Friendship University of Russia Named after Patrice Lumumba, 6, Miklukho-Maklaya Str., 117198, Moscow, Russia, igor_garkin@mail.ru

Aleksandr A. Kolesnikov, PhD, A/Professor, Peoples' Friendship University of Russia Named after Patrice Lumumba, 6, Miklukho-Maklaya Str., 117198, Moscow, Russia; The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, arka-92@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 10.09.2025
Одобрена после рецензирования 29.09.2025
Принята к публикации 29.09.2025

Submitted for publication 10.09.2025
Approved after review 29.09.2025
Accepted for publication 29.09.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 103–116.

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 (6): 103–116.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-103-116

EDN: QGDXGN

СОВРЕМЕННАЯ АРХИТЕКТУРА В ИСТОРИЧЕСКОМ ГОРОДЕ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Георгий Алексеевич Щуров

*Центральный научно-исследовательский и проектный институт
Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

Аннотация. Актуальность. Начало XXI в. постепенно окружает исторические здания городов современной многоэтажной застройкой, высотными зданиями жилых районов и торговых центров. Это вызывает вопросы о необходимости сохранения исторической архитектуры. Во многих городах мира за последние полвека архитектурных реконструкций проявились направления бережного отношения к истории и памятникам культурного наследия, сформировались определенные приемы в проектировании новых зданий, призывающих к историческим кварталам, улицам, площадям. Анализ существующего международного опыта архитектурного проектирования и реставрации зданий демонстрирует новые подходы к сохранению и адаптации объектов культурного наследия к жизни современного города и формированию принципов проектирования современных зданий в исторической среде старого города.

Цель исследования заключается в изучении опыта проектирования и строительства современных жилых и общественных зданий в пределах исторической части города в едином архитектурном пространстве.

Результаты исследования позволяют получить новые знания и методологии проектирования для создания современной застройки, способной гармонично существовать с историческими ансамблями прошлых столетий.

Ключевые слова: архитектура исторического города, историческая среда города, сохранение культурного наследия, существование исторической и современной архитектуры, формообразование современной застройки исторических городов

Для цитирования: Щуров Г.А. Современная архитектура в историческом городе. Проблемы и решения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 103–116. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-103-116. EDN: QGDXGN

ORIGINAL ARTICLE

MODERN ARCHITECTURE IN A HISTORICAL CITY.
PROBLEMS AND SOLUTIONS

Georgy A. Shchurov

*The Central Research and Design Institute for Urban Development
of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia*

Abstract. In the 21st century, historical buildings are gradually surrounded by modern high-rise buildings, residential areas and shopping centers, raising questions about preservation of the historical architecture. Over the past half century of architectural renovations in many cities around the world, there has been a shift towards preserving the historical and cultural heritage. Certain techniques are developed to design new buildings adjacent to historical streets and squares.

Methodology: The analysis of the international experience in architectural design and restoration of old buildings, new approaches to preservation and adaptation of the cultural heritage to the modern city and the formation of design principles of modern buildings in the historical environment of an old city.

Purpose: The aim of the work is to examine the experience in design and construction of modern residential and public buildings within the historical part of the city in architectural space.

Value: This research helps to gain new knowledge and design methodologies for creating modern buildings that can coexist harmoniously with historical ensembles of previous centuries.

Keywords: architecture, historical city, environment, cultural heritage, modern architecture

For citation: Shchurov G.A. Modern Architecture in a Historical City. Problems and Solutions. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 103–116. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-103-116. EDN: QGDXGN

Введение

Одной из самых сложных задач в процессе создания комфортной городской среды и строительства новых зданий является соотношение новой и старой застройки. Оценка возможности их гармоничного существования вблизи объектов историко-культурного наследия особенно актуальна. В последние десятилетия массовое строительство новых жилых районов в крупных городах и мегаполисах привлекает внимание архитекторов к выбору наиболее приемлемых решений для проектирования новой застройки в исторической городской среде.

Целью настоящей работы является анализ опыта отечественных и зарубежных архитекторов в проектировании и строительстве новых зданий, прилегающих к исторической застройке, для создания гармоничной и комфортной городской среды. Обращение к существующему опыту специалистов позволит выявить методики сохранения уникальности исторической архитектуры и определить возможные направления устойчивого развития современного строительства, обеспечивающие жителей крупных городов и мегаполисов современными объектами, необходимыми для комфортной жизни¹. Бережное со-

¹ Гутнов А. Центр города. Музей или активная жизнь? // Наука и жизнь. 1978. № 4. С. 69.

хранение и адаптация исторической среды городов к современной жизни, сохранение и «оздоровление» зелёных массивов, включение в застройку новых зданий, сомасштабных сложившейся исторической застройке города, с учётом потребностей и интересов населения, позволит сформировать новые методики архитектурного проектирования объектов в среде исторического города [1].

Отдельно стоящие уникальные исторические здания и архитектурные ансамбли все чаще уступают место новой дисгармоничной застройке, нарушая ритм жизни старых жилых районов [2]. Известно, что исторические центры, старинные улицы, парки, лесопарки и исторические архитектурные ансамбли являются точками притяжения туристов и горожан. Но строительство новых зданий и сооружений в каждом старом городе неизбежно, поэтому необходимо найти и сформулировать закономерности гармоничного соседства старой и новой застройки. Представленная статья посвящена анализу практической реализации проектных решений современной застройки в границах исторических центров с попыткой выработать принципы проектирования гармоничной и комфортной современной архитектуры в исторических городах.

Во второй половине XX в. во многих городах Европы и в нашей стране, после опустошительной Великой Отечественной войны, проводилась реконструкция и реновация с частичной или полной сменой функциональной нагрузки многих общественных и жилых зданий. Ключевым фактором в исследованиях и проектных предложениях того времени было бережное сохранение уникальности исторических городов с особо ценной застройкой и полноценное оздоровление городской среды, обновление и реновация предприятий, общественных центров, а также создание более развитой инфраструктуры. В современных городах возникает необходимость демонтажа или адаптации старой застройки к нуждам современного города. Однако новая застройка достаточно часто вносит диссонанс в сложившийся архитектурно-художественный облик города.

Обзор литературы

Начало XXI в. в архитектуре многих городов характеризуется реконструкцией и модернизацией исторической застройки, изменением ее структуры и обслуживания. Отношение к памятникам культурного наследия, исторической застройке и природной составляющей становится более осознанным. Десятилетия работы по реконструкции городской среды в разных городах мира позволили архитекторам сформировать основные направления и методологические особенности проектной деятельности, направленные на создание гармоничного образа города. Изучение опыта в области реставрации и реконструкции позволяет выделить направления проектирования современных зданий и сооружений в исторической среде для сохранения устойчивого развития современных городов.

Вопросами реконструкции исторических городов занимались многие исследователи: Е.В. Вержбицкая, Н.С. Гераскин, Н.Н. Гераскина, А.Л. Гельфонд, А.Э. Гутнов, К.А. Доксиадис, А.Б. Дьяков, П.Н. Казаков, Е.И. Кириченко, Г.А. Кругликова, Т.П. Кудрявцева, К. Линч, Е.Б. Морозова, Н.А. Сапрыкина, М.Р. Сцепуржинская, А.М. Тихомиров, Л.А. Шлычков, М.С. Штиглиц, Е.Г. Щеболев, З.Н. Яргина, А.С. Щенков и многие другие, которые рассматри-

вали вопросы реконструкции городской среды, жилых районов и промышленных зданий.

В середине XIX в., в период бурного роста городов и уплотнения застройки, появляются научные работы, посвящённые необходимости сохранения культурного наследия в процессе роста городов и строительства новых высотных зданий. Вопрос гармоничного сосуществования новой застройки в исторической среде города ещё сто лет назад поднимали многие архитекторы, в том числе известный теоретик Камилло Зитте. В книге, посвящённой изучению художественных основ градостроительства [3], он говорил о духовном потенциале каждого исторического города, заложенном в нем основателями и жителями за весь период существования.

Материалы и методы

Анализ проектов реконструкции городов отечественных и зарубежных проектов привёл к использованию комплекса методов, направленных на изучение возможности сосуществования современных зданий с историческими объектами. Материалами для научного исследования были выбраны успешные проекты современной застройки в исторической части города.

Обсуждение результатов

Строительство новых зданий в исторической части города во многих отечественных и зарубежных городах достаточно часто осуществляется за счёт уплотнения застройки или сноса исторических объектов. Эта проблема требует решения и реставрации старых зданий, их адаптации к жизни города и строительства новых зданий, гармонично вписывающихся в историческую среду города. Бережное сохранение сомасштабной среды исторического города и наличие зелёных пространств оказывает положительное воздействие на формирование «здравой» и комфортной городской среды, поддерживает потенциал города [4].

Примером бережного отношения к исторической архитектуре является г. Мейсон, на протяжении 300 лет сохраняющий старую фарфоровую мануфактуру и обеспечивая прилавки европейских торговых центров красивыми и нужными изделиями. Городу повезло в том, что его архитектура не пострадала в периоды разрушительных войн и не сталкивается сейчас с угрозой нового строительства, демонстрируя другим городам положительный пример отношения к своему культурному наследию. Фарфоровая мануфактура по-прежнему играет ключевую роль в социальной жизни горожан, поэтому её берегают, развивают, проводят обучение молодежи, проводят экскурсии для большого количества туристов из разных стран. Мануфактура до сих пор остается градоформирующим предприятием. Архитектура самого города не менее привлекательна для туристов, чем старая фабрика. Улицы исторического центра не перестраиваются, а бережно сохраняются и реставрируются (рис. 1).

Многие предприятия легкой промышленности Европы на протяжении сотен лет с переменным успехом занимаются производством продукции, сохранив не только рабочие места, жилье, но и памятники культурного наследия, а также развивают туризм и поддерживают экономику города. Сложный процесс взаимодействия старых и новых потребностей города решается на взаимо-

выгодных условиях для производства и архитектуры, благодаря чему молодёжь не стремится покинуть такие города ради лучшей жизни в мегаполисе. Напротив, она получает возможность обучаться и работать на старых предприятиях, являющихся частью городской жизни. В таких городах поддерживается социальная среда, сохраняется природная составляющая, проводится реставрация памятников культурного наследия, поэтому туристы приезжают любоваться сохранившейся исторической средой старых улиц и площадей [5]. Здесь пропорциональные соотношения между ростом человека и окружающей застройки остаются гармоничными. Форма и размеры оконных проёмов соответствуют не только стилистическим особенностям своей эпохи, но являются неотъемлемой частью общей гармонии застройки, поддерживают размеренный ритм улиц, а деревья создают уют и тишину, закрывая кронами от солнца маленькие кафе. Положительные примеры удачного современного внедрения застройки в архитектуру исторического города можно встретить во многих городах Европы. Здесь девелоперы часто становятся наиболее яростными защитниками истории, т. к. именно историческая застройка, ее масштаб и наличие зелёных массивов оказывают большее влияние на стоимость объектов недвижимости [6].



Рис. 1. Город Мейсон в Саксонии:

а – панорама города²; б – пешеходные улицы старого города³

Fig. 1. The city of Meissen in Saxony:

а – panorama; б – pedestrian streets in the old town

Одним из положительных примеров сохранения и реконструкции исторической городской среды можно назвать архитектуру Зальцбурга, в котором на протяжении более двух тысяч лет постепенно формировался уникальный градостроительный ансамбль. Так, застройка центральной площади старого города пополнялась новыми зданиями, однако архитектура, масштаб и пропорциональные соотношения подчинялись образу прошлых веков. Это делалось без малейшего нарушения целостности, лишь подчёркивая значимость исторической городской среды. Прекрасный пример – центральная средневековая площадь г. Домплац. На небольшой территории старой части города гармонично соседствуют разновременные здания. Здесь 400-летняя башня соединя-

² URL: <https://i.pinimg.com/736x/2e/89/a9/2e89a92841c4c630b43e41504fad3b7e.jpg>

³ URL: <https://extraguide.ru/images/t/1de9d7c911d90f013524fcfbfd150d452a89af04.jpg>

ется аркадами с современными зданиями, не нарушающими общую композицию и соразмерность ансамбля (рис. 2).



Рис. 2. Панорамы старого города:

а – вид на Зальцбург с высоты крепости Хоэнзальцбург⁴; *б* – фонтан Резиденцбронен, XVII в.⁵; *в* – историческая и современная застройка города⁶; *г* – масштаб современной застройки не нарушает, а подчеркивает памятники культурного наследия⁷

Fig. 2. Panoramas of the old city:

a – Salzburg view from the Hohensalzburg Fortress; *b* – Residenzbrunnen fountain built in the 17th century; *c* – historical and modern buildings; *d* – modern housing is not disruptive, but emphasizes monuments of cultural heritage

Примером удачного внедрения новой застройки в среду исторического города может служить архитектура старого английского города Лестер, построенного ещё древними римлянами. Несмотря на многочисленные реконструкции, город сохранил свою богатую историю (рис. 3). Архитектура Лестера сотни лет пополнялась зданиями разных эпох, встроенными в историческую архитектуру так, чтобы городская среда не нарушалась, а обогащалась новыми стилями, разнообразными элементами и цветовыми решениями. В некоторых случаях современная застройка контрастно врезается в историческую среду, дополняя её необычными формами и формируя новый архитектурно-художе-

⁴ URL: https://img-fotki.yandex.ru/get/6742/264922533.18/0_171f2b_fb1ab4e9_XL.jpg

⁵ URL: <https://travelata.ru/blog/wp-content/uploads/2019/07/square-rezidentsplats-photo-1.jpg>

⁶ URL: <https://www.mouvancevoyages.com/public/kcfinder/upload/1920x870/files/destination/autriche/Autriche-Salzburg-ville-par-Julius-Silver.jpg>

⁷ URL: https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen_doc/1899275/pub_5dc1ebb43d873600b0926ad2_5dc1ef7e35ca3100ad6e7fe5/scale_1200

ственний образ старого города. На рис. 3 представлена центральная площадь, где хорошо видны жилые и общественные здания, построенные с разницей в сто и более лет. Масштабность застройки обусловлена комплексным научным подходом к изучению архитектуры. Здесь не только внешние габариты зданий вписываются в общий ритм, но и каждый элемент фасада становится частью общей картины архитектурно-художественного образа средневековой площади с кафедральным собором.



Рис. 3. Разнообразие застройки г. Лестер:
а – кафедральная площадь города⁸; б – романтика старых улиц⁹
Fig. 3. The diversity of Leicester's development:
a – the cathedral square; b – the romance of old streets

Архитектура старых городов в начале XXI в. насыщена разновременной застройкой, разнообразием стилевых особенностей и богатой цветовой палитрой. Это привлекает внимание и вносит разнообразие в постоянно увеличивающуюся и разрастающуюся современную жилую среду, не обладающую, как правило, ценностными художественными характеристиками [8]. Особая ценность и уникальность среды современного города формируется благодаря гармоничному сосуществованию старой и новой архитектуры, это важное качество города. На рис. 4 представлены интересные объекты середины XIX в. в Гамбурге и Рыбинске Ярославской области, которые после проведения реставрационных работ продолжают успешно служить городу. Эти примеры демонстрируют положительный опыт сохранения истории и архитектурно-художественного образа города. Реставрация таких объектов оказала существенное влияние на развитие экономики этих городов, привлекая многочисленных туристов.

В проекте реконструкции и восстановления складского района Шпайхерштадт в Гамбурге было принято решение сохранить архитектурно-художественный облик района с частичным изменением его функциональной нагрузки. Такой подход позволил современному городу сохранить свою уникальность (рис. 4, а). Отечественным примером развития исторической ткани города является Рыбинск (Ярославская область), где проводилась реставрация жилых зданий рядовой застройки. Благодаря тщательному колористическому

⁸ URL: <https://a0.muscache.com/im/pictures/hosting/Hosting-U3RheVN1cHBseUxpc3Rpbmc6MTMzNzI5MTIwNDIwOTcxMzg5OA%3D%3D/original/838eb0ce-6697-4487-a9bc-cd6b23ea13af.jpeg>

⁹ URL: https://live.staticflickr.com/3537/3348795495_672f0c0ecf_b.jpg

решению старых улиц и сохранению архитектурно-художественного образа среди городов стал очень привлекательным не только для жителей, но и для туристов. Улицы Рыбинска часто становятся площадкой для съемки исторических фильмов (рис. 4, б).



Рис. 4. Гармоничное сосуществование исторической застройки в структуре современного города:

а – Гамбург, старые здания получили новую жизнь после реставрации¹⁰; б – улица Рыбинска Ярославской области после проведения реставрации зданий¹¹

Fig. 4. Harmonious coexistence of historical buildings in the modern city:
a – old buildings in Hamburg after restoration; b – Rybinsk street in the Yaroslavl Region after restoration

Барселона – город с уникальным архитектурно-художественным образом, в нем удачно уживаются самые разнообразные здания, архитектурные стили и направления. Здесь памятники культурного наследия вплотную призывают к современным жилым зданиям (рис. 5, а). Венеция тоже известна примерами бережного отношения к исторической застройке. Здесь каждое новое здание аккуратно вписывается в сложившуюся за столетия историческую застройку (рис. 5, б), дополняя архитектуру города новыми направлениями, со- масштабными старой застройке.

Старые, иногда заброшенные, ансамбли и комплексы жилого и промышленного назначения довольно часто находятся в центральных частях городов Центральной России, напоминая о былом величии страны. Эти архитектурные ансамбли являются уникальными памятниками истории и нуждаются в реставрации, реновации, приспособлении к новым условиям жизни города. Сейчас в нашей стране сохранение и реновация культурного наследия являются крайне важным направлением действия специалистов в области архитектуры и градостроительства [7, 9], поскольку многие уникальные комплексы уже утрачены. На рис. 6 представлены положительные примеры реставрации и приспособле-

¹⁰ URL: https://fhd.videouroki.net/tests/536740/image_63c54b45b20c9.png

¹¹ URL: <https://gazeta-rybinsk.ru/wp-content/uploads/2020/08/gorod9.jpg>

ния комплексов промышленных предприятий XIX в., успешно адаптированных в среду мегаполиса.



Рис. 5. Единство старой и новой застройки в структуре города:

а – Барселона, памятники культурного наследия соседствуют с соразмерной современной застройкой¹²; б – Венеция: жилые здания, построенные в разные исторические периоды, создают единую панораму благодаря соразмерности и общим масштабам застройки¹³

Fig. 5. Old and new buildings in the city structure:

а – cultural heritage monuments with modern buildings in Barcelona; b – residential buildings in Venice built in different historical periods



Рис. 6. Краснокирпичная архитектура промышленных предприятий:

а – Обуховский завод в Санкт Петербурге¹⁴; б – Даниловская мануфактура в Москве после восстановления¹⁵

Fig. 6. Red-brick architecture of industrial enterprises:

а – Obukhov's Factory in Saint-Petersburg; b – Danilov's Manufactory in Moscow after restoration

Ещё одним важным критерием успешного развития городов является необходимость сохранения панорамных видов памятников и возможности об-

¹² URL: <https://i.pinimg.com/originals/b4/86/40/b4864062d1001b606d067ec2083d6f55.jpg>

¹³ URL: <https://img.tourister.ru/files/1/1/6/9/7/2/3/2/original.jpg>

¹⁴ URL: https://avatars.dzeninfra.ru/getzen_doc/2807006/pub_5f9ecc333910530e0d9c0096_5f9ed4f13910530e0daff328/scale_1200

¹⁵ URL: https://avatars.mds.yandex.net/i?id=17486db354ff9f635e5e1b1dfcaaf378_1-5208943-images-thumbs&n=13

зора архитектурных ансамблей. Панорамы остаются в памяти человека навсегда и являются своеобразным символом идентичности города. Во второй половине XIX в. комплексы промышленных предприятий, располагавшиеся на берегах рек как важных транспортных артерий, дополняли силуэт старого города и его сакральные доминанты зданиями рабочих цехов. Сегодня речные панорамы многих городов являются преимуществом и ценностными характеристиками городской среды [10].

Сохраненное промышленное здание Невской мануфактуры на Октябрьской набережной Санкт-Петербурга (рис. 7, а) является важным для истории города и ценной для горожан частью градостроительной среды. Подобные виды запоминаются навсегда, они уникальны и узнаваемы, а значит, крайне важны для города [10]. Композиционное решение речных и морских фасадов комплекса промышленных или общественных зданий подчеркивает красоту архитектурного ансамбля, напоминая о расцвете промышленности в России через доминанты труб и башни административного корпуса.



*Рис. 7. Панорамы городов создают художественный образ города:
а – Выборгская бумагопрядильная фабрика, Санкт-Петербург¹⁶; б – реконструкция района Доклендс¹⁷*

*Fig. 7. Panoramas of cities create an artistic image of the city:
а – Vyborg Paper Mill in Saint-Petersburg; б – reconstruction of the Docklands region in London*

Ещё одним ярким положительным примером является градостроительная реконструкция известного района Доклендс в Лондоне (рис. 7, б). В результате изменения генерального плана, увеличения этажности, реконструкции района старого порта город получил торговый и офисный центры, гостиницы и комфортное жилье для населения. Количество жителей района и мест работы увеличилось в два раза, инфраструктура пополнилась новыми зданиями, изменение транспортных связей позволило обеспечить связь района с городом. Часть старой застройки Лондонского порта была сохранена как воспоминание об исторической набережной, как уникальный архитектурно-художественный образ старого города.

¹⁶ URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/13/Nevka_Cotton_Manufactory.jpg/960px-Nevka_Cotton_Manufactory.jpg

¹⁷ URL: <https://i.pinimg.com/originals/a7/20/0d/a7200d58a13916859ce5f0289ec5932b.jpg>

Обычно там, где уже созданы высотные здания, исправлять ситуацию нет необходимости. Однако старые кварталы можно поддерживать с помощью реставрационных работ, включая новые здания, которые подчеркивают устоявшиеся стилистические особенности или масштаб среды. В таких местах люди чувствуют себя частью архитектурного пространства города (рис. 8, *а*). Улицы старой части города более привлекательны для людей, т. к. они сомасштабны человеку и гармоничны для восприятия (рис. 8, *б*).



Рис. 8. Современная архитектура в среде старого города. Памятники культурного наследия в среде современного города:

а – Винокурня в Торонто¹⁸; *б* – Музей науки и промышленности. Группа научных музеев, Лондон¹⁹

Fig. 8. Modern architecture in the old city and cultural heritage monuments in the modern city:
a – distillery in Toronto; *b* – Science and Industry Museum in London

Таким образом, специфика подхода к реорганизации архитектуры городской среды обусловлена необходимостью проведения комплексных научных исследований для выявления потенциала и особенностей архитектуры городской среды. При этом комплексы старых общественных и промышленных зданий, сохранивших масштаб и уникальность архитектуры старого города, становятся местами притяжения для всех жителей не только благодаря функциональному наполнению, но в первую очередь своему архитектурно-художественному образу.

Проекты реконструкции исторических районов города, к сожалению, выполняются профессиональными архитекторами лишь по заказу, но студенческие проекты иногда представляют интересные предложения по восстановлению архитектурных ансамблей (рис. 9). Примером может служить дипломный проект будущего архитектора, посвященный восстановлению зданий и сооружений ликероводочного завода «Кристалл» в Калуге. Проектное решение предлагает восстановить уникальность краснокирпичной промышленной архитектуры конца XIX – начала XX в., гармонично вписав ее в окружающую застройку и предложив систему озеленения всего жилого района. Ансамбль зданий и сооружений старого завода становится общественным центром и зелёной зоной для города. Подобные удачные предложения должны стать осно-

¹⁸ URL: https://otvet.imgsmail.ru/download/u_c53bf32a27ce42f9c6a9f237bd7962b9_800.jpg

¹⁹ URL: <https://dynamic-media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-o/1b/d2/0d/4c/photo-of-the-science.jpg?w=1000&h=700&s=1>

вой будущих проектных решений по восстановлению большого количества памятников культурного наследия в разных городах для создания комфортной городской среды. Здесь восстанавливается каждая деталь промышленного здания, подчёркивая сомасштабность застройки и красоту каждого элемента в отдельности, а система озеленения территории создаёт уют и обеспечивает население здоровым микроклиматом.



Рис. 9. Дипломная работа Валерия Хабарова. Восстановление ликероводочного завода «Кристалл» в Калуге. Руководитель А.И. Томилова, Российской академия живописи, ваяния и зодчества Ильи Глазунова²⁰
Fig. 9. Diploma work by Valery Khabarov. Restoration of the distillery “Kristall” in Kaluga. Head of A.I. Tomilova. Russian Academy of Painting, Sculpture and Architecture of Ilya Glazunov

В настоящем исследовании были проанализированы примеры успешного существования современных и старых зданий в исторической городской среде, включая объекты культурного наследия в разных городах и странах. Обобщая результаты, можно отметить, что представленные примеры демонстрируют умелую организацию городской среды благодаря соразмерной и сомасштабной современной архитектуре, вписанной в историческую ткань города. Следует выделить стилистическое разнообразие проектных решений, научный подход к переосмыслинию и роли архитектурно-художественного образа современного города. Важным фактором является то, что многие рассматриваемые объекты не обладают статусом охраняемых памятников, но отношение к ним неизменно бережное, сохраняющее уникальность зданий и всего города. Исследуемые примеры демонстрируют разные подходы к реконструкции среды исторического города и различные приёмы работы архитекторов.

Заключение

Представленный анализ демонстрирует необходимость сохранения в структуре города исторических архитектурных ансамблей, отдельно стоящих зданий, культурных ландшафтов, парков, скверов, промышленных предприятий и рядовой исторической застройки, как особо ценной среды для сохранения идентичности современных городов и культуры в целом. Историческая архитектура и памятники культурного наследия являются составной частью городской среды и несут важную информацию будущим поколениям. Они форми-

рутют культурно-исторический контекст, крепкое ядро национального сознания, любовь к родине и основу национальной культуры.

Основываясь на исследовании известных примеров, следует отметить, что в процессе реконструкции архитектуры городов необходимо придерживаться методов скрытой, деликатной пристройки современных зданий к старым. Современные здания должны становиться частью исторически сложившейся среды, не нарушая пропорций и визуальных связей, с меньшей высотностью и некоторым отступом от линии застройки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Линч К.* Образ города / пер. с англ. В.Л. Глазычева. Москва : Стройиздат, 1982. 328 с.
2. *Гутнов А.Э., Глазычев В.Л.* Мир архитектуры: Лицо города. Москва : Молодая гвардия, 1990. 352 с. (Эврика). ISBN 5-235-00487-60.
3. *Зимте К.* Художественные основы градостроительства / пер. с нем. и предисл. Я.А. Крастиныша. Москва : Стройиздат, Б. г. 255 с. ISBN 5-274-00770-8.
4. *Гандельсман Б.В., Милашевская А.Н.* Современные методы сохранения и восстановления исторических центров средних и больших городов бассейна Средней Волги // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020 № 3 (52). С. 295–318. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15217. EDN: LJCFNA. URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/3kvert20/PDF/17_gandelsman.pdf
5. *Панкратова А.А., Соловьев А.К.* Проблемы сохранения и использования исторической застройки в современной архитектуре города // Вестник МГСУ. 2015. № 7. С. 7–16. EDN: UAPRVB. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-sohraneniya-i-ispolzovaniya-istoricheskoyzastroyki-v-sovremennoy-arhitekture-goroda>
6. *Крашенинников А.В.* Градостроительное развитие жилой застройки: исследование опыта западных стран. Москва : Архитектура-С, 2005. 112 с. ISBN 5-9647-0032-2.
7. *Романова Л.С., Литвинова О.Г.* Современная застройка в исторических центрах городов. Исследование проблемы. Перспективы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2. С. 65–76. EDN: KXDSKZ
8. *Иконников А.В., Гуляницкий Н.Ф.* Памятники архитектуры в структуре городов СССР. Москва : Стройиздат, 1978. С. 7–43.
9. *Малая Е.В.* Проблемы восстановления и развития городской среды старых промышленных центров // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 42–55. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-42-55. EDN: TSFJMP
10. *Штиглиц М.С.* Историко-культурный статус как инструмент регламентации при перепрофилировании памятников промышленной архитектуры (на примере Петербурга) // Архитектурно-градостроительный процесс: Регламентация и свобода : сборник научных трудов НИИИАГ РААСН. Москва : Ленанд, 2013. С. 378–391. EDN: VHPVGK

REFERENCES

1. *Lynch K.* The Image of the City. A.V. Ikonnikov, Ed. Moscow: Stroyizdat, 1982. 326 p. (Russian translation).
2. *Gutnov A.E., Glazychev V.L.* The World of Architecture: The Face of the City. Moscow: Mолодая Гвардия, 1990. 352 p. ISBN 5-235-00487-60. (In Russian)
3. *Camillo S.* City Planning According to Artistic Principles. Moscow: Stroyizdat, 1991. 255 p. (Russian translation)
4. *Gandelsman B.V., Milashevskaya A.N.* Modern Methods of Preservation and Restoration of the Historical Centers of Medium-Sized and Large Cities in the Middle Volga Basin. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020; 3 (52): 295–318. DOI:10.24411/1998-4839-2020-15217. (In Russian)
5. *Pankratova A.A., Solovyov A.K.* Problems of Preservation and Use of Historical Buildings in Modern Urban Architecture. *Vestnik MGSU*. 2015; (7): 7–16. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-sohraneniya-i-ispolzovaniya-istoricheskoyzastroyki-v-sovremennoy-arhitekture-goroda> (accessed July 15, 2025). (In Russian)

6. Krasheninnikov A.V. Urban Planning Development of Residential Areas: A Study of the Experience of Western Countries. Moscow: Arkhitektura-S, 2005. 112 p. (In Russian)
7. Romanova L.S., Litvinova O.G. Modern Development in Historical City Centers. Research of the Problem. Prospects. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; (2). Pp. 65–76. EDN: KXDSKZ (In Russian)
8. Ikonnikov A.V., Gulyanitsky N.F. Architectural Monuments in the Structure of Soviet Cities. Moscow: Stroyizdat, 1978. Pp. 7–43. (In Russian)
9. Malaya E.V. Problems of Restoration and Development of the Urban Environment in Old Industrial Centers *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 23 (6): 42–55. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-42-55. EDN: TSFJMP (In Russian)
10. Stiglitz M.S. Historical and cultural status as a regulatory tool in the redesign of industrial architecture monuments (the Saint-Petersburg case study). In: Architectural and urban planning process: Regulation and freedom. Moscow: Lenand, 2013. Pp. 378–391. (In Russian)

Сведения об авторе

Щуров Георгий Алексеевич, Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29, info@spaceship.ru

Authors Details

Georgy A. Shchurov, The Central Research and Design Institute for Urban Development of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 29, Vernadskii Ave., 119331, Moscow, Russia, info@spaceship.ru

Статья поступила в редакцию 28.08.2025
Одобрена после рецензирования 10.09.2025
Принята к публикации 25.09.2025

Submitted for publication 28.08.2025
Approved after review 10.09.2025
Accepted for publication 25.09.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 117–140.

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 (6): 117–140.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.844.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140

EDN: TAIVPW

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ЗДАНИИ

Сергей Николаевич Овсянников^{1,2}, Михаил Сергеевич Овсянников³

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

²Научно-исследовательский институт строительной физики,
г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность работы обусловлена недостаточностью существующих инженерных методов расчета звукоизоляции, которые не учитывают потери энергии, размеры конструкций, влияние примыкающих элементов и структурную звукопередачу, особенно актуальную при использовании легких и многослойных ограждений. Отсутствие инструментов для прямого расчета уровней звука и вибрации затрудняет оценку соответствия проектов санитарным нормам.

Цель исследования – разработка основ математического моделирования распространения звука в зданиях для создания инженерных методов и программного комплекса, позволяющих рассчитывать звукоизоляцию ограждающих конструкций, уровни звукового давления в помещениях и параметры вибрации с учетом прямой, косвенной и структурной передачи энергии.

Материалы и методы исследования включают энергетические методы (постановка общей задачи баланса звуковой энергии) и волновую теорию (расчет частных задач прохождения звуковой энергии). Представлены аналитические модели для расчета звукоизоляции одно- и многослойных конструкций, а также модели распространения звука в комплексных фрагментах здания с использованием методологии ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012 и метода статистического энергетического анализа (СЭА).

Результаты. Разработаны математические модели и алгоритмы для трехуровневой системы расчетов: собственной звукоизолирующей способности конструкций; звукоизо-

ляции с учетом косвенной и структурной передачи; уровней звука и вибрации в помещениях на основе СЭА. Модели являются основой для создания параметрического программного комплекса проектирования звукоизоляции в зданиях с учетом структурной звукопередачи.

Ключевые слова: звук, вибрация, звукоизоляция, структурная звукопередача, математическое моделирование

Финансирование: работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.5.

Для цитирования: Овсянников С.Н., Овсянников М.С. Математическое моделирование распространения звука в здании // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 117–140. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140. EDN: TAIVPW

ORIGINAL ARTICLE

MATHEMATICAL SIMULATION OF SOUND PROPAGATION IN A BUILDING

Sergei N. Ovsyannikov^{1,2}, Mikhail S. Ovsyannikov³

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

²*Research Institute of Structural Physics, Moscow, Russia*

³*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Abstract. The relevance of this work is determined by inadequacy of engineering methods for calculating sound insulation, which do not consider energy losses, dimensions of constructions, influence of adjacent elements, and structural sound transmission, which is particularly relevant in using lightweight and multi-layer enclosures. The lack of tools for direct calculation of sound and vibration levels makes it difficult to assess the compliance of projects with sanitary standards.

Purpose: The aim of this work is to develop bases for mathematical simulation of the sound propagation in buildings in order to create engineering methods and software for calculating the sound insulation of enclosing structures, sound pressure levels in rooms, and vibration parameters with regard to direct, indirect, and structural energy transmission.

Methodology: Energy methods (sound energy balance) and wave theory (sound energy transmission). Analytical models are used to calculate the sound insulation of single- and multi-layer structures, models of sound propagation in complex building fragments in accordance to GOST R EN 12354-1-2012 and the statistical energy analysis.

Research findings: Mathematical models and algorithms are developed for a three-level calculation system: inherent sound insulation capacity of structures, sound insulation with indirect and structural transmission, sound and vibration levels in rooms based on statistical energy analysis. The proposed models form the basis for the creation of parametric software to design sound insulation in buildings, taking into account structural sound transmission.

Keywords: sound, vibration, sound insulation, structural sound transmission, mathematical simulation

Funding: this work was financially supported by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Project No. 3.1.4.5).

For citation: Ovsyannikov S.N., Ovsyannikov M.S. Mathematical Simulation of Sound Propagation in a Building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 117–140. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140. EDN: TAIVPW

Введение

Существующие в настоящее время и используемые проектным сообществом России методы расчетов звукоизоляции практически не изменились за последние полвека и основаны на графоаналитическом построении частотных характеристик изоляции воздушного шума простейших одно- и двухслойных ограждающих конструкций или табличного определения индексов изоляции воздушного и приведенного уровня ударного шума по СП 275.1325800.2016. При этом расчет ведется без учета потерь энергии, размеров самих конструкций, а также влияния примыкающих конструкций на звукоизоляцию. Нет и методов расчета непосредственно уровней звука и вибрации при заданных характеристиках источников, что не позволяет оценить выполнение санитарных норм при проектировании зданий, оснащенных различным оборудованием. Известны зарубежные компьютерные программы Insul, Bastian и др., позволяющие получать частотные характеристики и индексы изоляции воздушного и ударного шума ограждающих конструкций достаточно широкой типологии. Однако, как указывают их разработчики, с увеличением сложности и числа слоев в конструкции существенно снижается сходимость результатов расчета с результатами измерений: точность расчетов для однослойных конструкций оценивается в 3...4 дБ, для многослойных – существенно меньше, что является следствием теоретических упрощений. Bastian позволяет моделировать структурную звукопередачу между двумя помещениями для уточнения индекса звукоизоляции ограждений.

Для отечественной проектной практики целесообразно предложить аналитические решения задач расчета звукоизоляции разнообразных одно- и многослойных конструкций, реализованные в виде программных модулей, которые можно интегрировать в технологии информационного моделирования (ТИМ) зданий. При использовании легких и многослойных ограждающих конструкций на звукоизоляцию существенно влияет структурная звукопередача по примыкающим конструкциям, снижая фактические индексы изоляции воздушного и ударного шума до 10 дБ. Поэтому расчет и проектирование звукоизоляции следует вести через моделирование потоков энергии звука и вибрации в рассматриваемом фрагменте здания, состоящем как минимум из двух смежных помещений. Для проектной практики актуальна разработка программного комплекса, который рассчитывает звукоизоляцию, уровни звука и вибрации по описанию конструктивных особенностей исследуемого характерного фрагмента здания и по заданным параметрам мощности источников. Создание программного комплекса для расчета уровней звука и вибрации в характерных фрагментах здания при заданных параметрах мощности источников и детальном описании особенностей конструктивной системы здания является актуальной задачей для проектной практики. Для практических целей можно предложить 3 уровня сложности виброакустических расчетов зданий: 1) расчет собственной звукоизолирующей способности одно- и многослойных конструкций; 2) расчет звукоизоляции одно- и многослойных конструкций с учетом косвенной и структурной звукопередачи через непосредственно примыкающие к ограждению конструкции; 3) расчет уровней звукового давления и параметров вибрации на конструкциях в фрагменте здания из нескольких помещений и ограждающих их конструкций.

Аналитические решения задачи расчета звукоизоляции впервые были представлены в работах Р. Бергера и Рэлея. Л. Кремером [1] предложен механизм волнового совпадения. В более поздних работах в механизме прохождения звука через однослойную панель были выделены нерезонансная (инерционная) и резонансная звукопередачи за счет излучения свободных волн на резонансных частотах. В России двойная природа прохождения звука исследовалась М.С. Седовым и его учениками [2, 3, 4]. Теоретическую и методологическую основу расчета звукоизоляции однослойных конструкций за рубежом заложили труды Е. Севелла [5], Г. Майданика [6], Р. Жосса и Дж. Ламура [7]. На их базе были разработаны сначала европейские, а затем и российские нормативы, утвержденные в ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012¹ (ч. 1, прил. В). Данный стандарт обеспечивает удовлетворительную сходимость результатов расчета с лабораторными измерениями.

При определении резонансных и инерционных коэффициентов излучения звука конструкцией конечных размеров за рубежом используются также более сложные экспериментальные и аналитические результаты С. Уоллеса [8] и Ф. Леппингтона [9]. Звукоизоляцию двухслойных конструкций впервые описал А. Лондон [10], показав закономерности влияния воздушного промежутка на прохождение звука. В зарубежных программных комплексах используются формулы К. Гезеле [11] для расчета двойных конструкций с воздушным промежутком, они применяются и в более современных работах, хотя на практике неприемлемо завышают звукоизоляцию на высоких частотах [12]. Наиболее полно современное состояние теории прохождения звука через ограждающие конструкции и методологии расчета звукоизоляции различных типов конструкций представлены в книге Д. Риндела [13].

Расчетам распространения звука во фрагменте здания с учетом прямой и структурной звукопередачи посвящено множество научных трудов, однако в практике проектирования они до настоящего времени практически не используются. Родоначальником теории расчета структурной звукопередачи принято считать В. Вестфала, впервые представившего конструктивную систему здания как совокупность связанных элементов, для которых можно записать уравнения баланса энергии изгибных волн с учетом потерь и передачи в смежные конструкции [14]. Из этой теории появились два методологических направления.

Первое – поточно-энергетический метод, который лег в основу методики В.И. Зaborова [15], предназначенный для расчета звукоизоляции смежных помещений с учетом структурной звукопередачи, и методики расчета распространения звуковой вибрации на судах [16]. Зарубежные многочисленные исследования на основе поточно-энергетического метода реализованы в ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012. Ограничением данной методики является возможность расчета звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи только для двух смежных помещений. Такой расчет требует от проектировщика значительных трудозатрат и погружения в теорию виброакустики. Примером компьютерной реализации этой методики является программа Cadna B от Bastian.

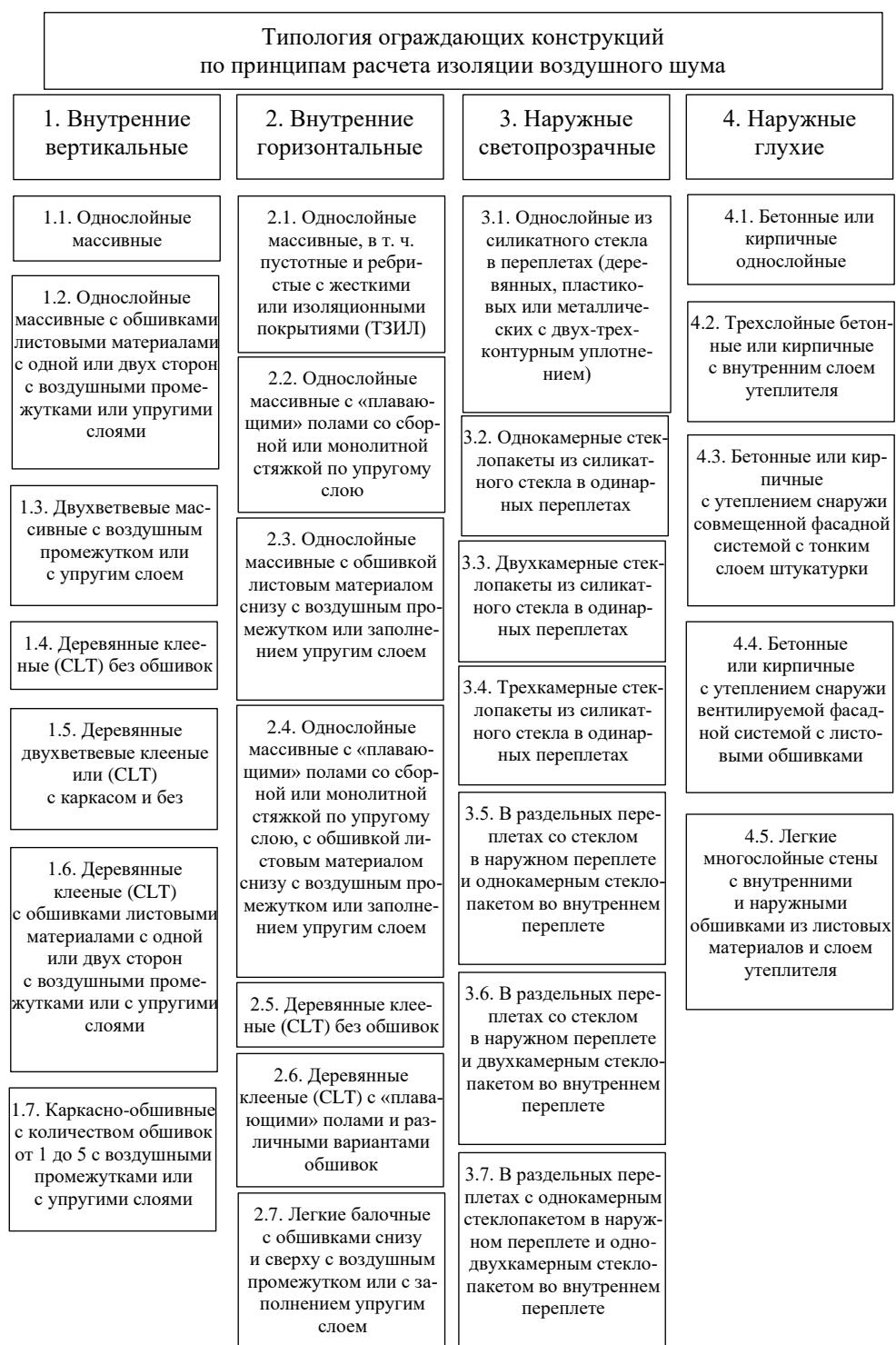
¹ ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012. Акустика зданий. Методы расчёта акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Часть 1. Звукоизоляция воздушного шума между помещениями. Москва: Стандартинформ, 2013. 78 с.

Второе направление реализовано в методе статистического энергетического анализа (СЭА), принципиально отличающееся от поточно-энергетического метода учетом только резонансной составляющей энергообмена между подсистемами, в качестве которых рассматриваются помещения и конструкции [17]. Расчет резонансной звукопередачи основан на определении числа и плотности мод колебаний. Коэффициенты энергетической связи между подсистемами определяются через отношения модальных плотностей в подсистемах, что уменьшает объем вычислений. В России данный подход использован в ряде наших последних работ [18, 19], за рубежом наиболее известны исследования в этом направлении Р. Крэйка [20] и К. Хопринса [21]. Основной проблемой СЭА является представление инерционной звукопередачи как дополнительного обходного пути прохождения звука в составе математической модели распространения звуковой энергии, что впервые было предложено М. Крокером и А. Прайсом [22] и используется до настоящего времени. В работе [23] предпринята попытка записать инерционную звукопередачу через импеданс возбуждаемой звуковым полем панели с учетом ее массы, изгибной жесткости и внутренних потерь, это дает возможность математической записи инерционной и резонансной звукопередачи непосредственно между связанными элементами здания в уравнениях баланса звуковой энергии.

Аналитические решения задачи прямого прохождения звука через ограждения

В современных зданиях применяются не только однослойные массивные ограждающие конструкции, но и легкие многослойные: двухветвевые перегородки из легкобетонных материалов, легкобетонные ограждения с дополнительной обшивкой листовыми материалами и без них, каркасно-обшивные перегородки, перекрытия с «плавающими» полами и подвесными звукоизолирующими потолками. Для разработки программы расчета изоляции воздушного шума можно представить типологию ограждающих конструкций по принципам вычислений в виде схемы (рис. 1). Как показано на схеме, наибольшее разнообразие решений характерно для конструкций стен и перекрытий. Это связано, в частности, с применением клееных деревянных конструкций (CLT), которые являются новыми для российской строительной практики. Их особенность заключается в малой плотности материала ($550 \text{ кг}/\text{м}^2$), в 5 раз ниже плотности железобетона, и достаточно высоком модуле упругости вдоль волокон ($6,2 \text{ ГПа}$ [13]). Для обеспечения огнестойкости и звукоизоляции ограждений с несущими панелями CLT необходимы обшивки по вариантам. Новыми для российской практики являются и многослойные каркасно-обшивные конструкции.

Значительное количество вариантов возникает и для наружных светопрозрачных конструкций, в которых применяются остекления с использованием силикатных стекол и клееных триплексов. Обеспечение нормируемой теплозащиты достигается за счет применения двухкамерных стеклопакетов, а на территориях с низкими расчетными температурами целесообразно применение конструкций в раздельных переплетах с количеством стекол до 5. Увеличение числа стекол и воздушных промежутков с разной их толщиной позволяет достичь высокой звукоизоляции – до 50 дБ и выше.



*Рис. 1. Типы ограждающих конструкций по принципам расчета звукоизоляции
Fig. 1. Enclosing structures classified according to calculation principles of sound insulation*

Современные наружные стены из легкобетонных материалов с вентилируемыми или совмещенными фасадными системами также представляют интерес с точки зрения обеспечения звукоизоляции вследствие малой поверхностной массы несущей части конструкции и незначительного влияния на звукоизоляцию очень легкой и негерметичной фасадной системы.

В общем случае все типы наружных и внутренних конструкций сводятся к однослойным и многослойным с упругими слоями между панелями. Расчет звукоизоляции однослойных массивных и легких акустически однородных, сплошных и пустотных конструкций можно представить в виде последовательности процедур.

1. Первым расчетным элементом можно назвать блок расчета поверхностной массы и критической частоты ограждающей конструкции в зависимости от плотности, модуля упругости материала и с учетом конструкции ограждения. Для сплошных конструкций поверхностная масса определяется как произведение плотности материала на толщину $m = \gamma \cdot h$. Для пустотных конструкций (обычно перекрытий с круглыми или овальными пустотами) следует предварительно вычислить приведенную толщину, м:

$$h_{\text{пр}} = \frac{b \cdot h - \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4}}{b}, \quad (1)$$

где b – ширина плиты перекрытия; h – толщина плиты перекрытия (плиты настила); d – диаметр пустот в плите перекрытия; n – количество пустот в плите перекрытия.

Для пустотных конструкций определим момент инерции, м^4 , для сечения конструкции. Так, для пустотных плит момент инерции

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{n \cdot \pi \cdot d^4}{64} \quad (2)$$

и изгибная жесткость $B = EI$.

Получив эти результаты, определим критическую частоту, при которой длина изгибной волны совпадает со следом падающей звуковой волны из воздуха помещения (скорость изгибной волны в конструкции и скорость звука в воздухе равны), что приводит к увеличению амплитуды колебаний панели и снижению звукоизоляции:

$$f_c = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}, \quad (3)$$

где $c_o = 340 \text{ м/с}$ – скорость звука в воздухе.

Для массивных конструкций представляет интерес и частота вырождения волн чистого изгиба, на которой фазовая скорость распространения изгибных волн по элементарной теории равна фазовой скорости сдвиговых волн:

$$f_s = \frac{c_s^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}, \quad (4)$$

где c_s – скорость сдвиговой волны в материале конструкции.

2. Второй расчетный блок включает известные процедуры определения коэффициентов инерционной и резонансной звукопередачи для однослоиной массивной или легкой ограждающей конструкции по методике ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012 в расчетном частотном диапазоне от 100 до 3150 Гц. Для этой цели вычисляются коэффициенты излучения вынужденных волн [5]:

$$\sigma_f = 0,5 \left[\ln \left(\frac{2\pi f}{c_o} \sqrt{a \cdot b} \right) - \Lambda \right], \quad (5)$$

где $\Lambda = -0,964 - \left(0,5 + \frac{b}{\pi a} \right) \ln \frac{b}{a} + \frac{5b}{2\pi a} - \frac{c_o^2}{16a \cdot b \cdot \pi^3 \cdot f^2}$,

где a и b – размеры ограждающей конструкции.

Необходимо определить также коэффициенты излучения свободных волн [6].

На частотах выше критической частоты

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \leq 2,0; \quad f > f_c. \quad (6)$$

В полосе критической частоты

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{a}{\lambda_{bc}}} + \sqrt{\frac{b}{\lambda_{bc}}} \leq 2,0; \quad f = f_c, \quad (7)$$

где $\lambda_{bc} = \frac{\pi \cdot h \cdot c_l}{\sqrt{3} \cdot c_o}$ – длина изгибной волны в панели на критической частоте.

На частотах ниже критической

$$\sigma_r = \frac{4c_o}{f_c} \delta_1 + \delta_2; \quad f < f_c, \quad (8)$$

где $\delta_1 = \frac{(1 - \lambda^2) \ln \left(\frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} \right) + 2\lambda}{4\pi^2 (1 - \lambda^2)^{1,5}};$ $\quad (9)$

$$\delta_2 = \frac{8c_o^2 (1 - 2\lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 a \cdot b \cdot \lambda \sqrt{1 - \lambda^2}}, \quad f < \frac{1}{2} f_c; \quad (10)$$

$$\delta_2 = 0; \quad f > \frac{1}{2} f_c. \quad (11)$$

По коэффициентам излучения вычисляются коэффициенты инерционного прохождения звука однослоиной конструкции:

$$\tau_f = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} 2\sigma_f; \quad f < f_c; \quad (12)$$

$$\tau_f = 0; \quad f \geq f_c, \quad (13)$$

а также коэффициенты резонансного прохождения звука в диапазонах:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \frac{f_c}{f} \frac{\pi \cdot \sigma_r^2}{2\eta_{tot}}; \quad f > f_c; \quad (14)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \frac{\pi \cdot \sigma_r^2}{2\eta_{tot}}; \quad f = f_c; \quad (15)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \frac{(a+b)^2}{a^2 + b^2} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \frac{\sigma_r^2}{\eta_{tot}}; \quad f < f_c. \quad (16)$$

Суммируя коэффициенты инерционного и резонансного прохождения, в каждой третьоктавной полосе частот определим звукоизоляцию:

$$R = -10 \lg (\tau_f + \tau_r). \quad (17)$$

3. В многослойных конструкциях с воздушными промежутками, упругими слоями и виброподвесами возникают резонансы типа «масса – упругость – масса» [24, 25, 26].

Для двойных ограждений с воздушным промежутком резонансная частота

$$f_o = 60 \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)}{d \cdot m_1 \cdot m_2}}, \quad (18)$$

где d – толщина воздушного промежутка; m_1 и m_2 – поверхностные массы панелей (обшивок, листов).

Для двойных ограждений с упругим слоем резонансная частота

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}}, \quad (19)$$

где $k = \frac{E_d}{d}$ – динамическая жесткость упругого слоя; E_d – динамический модуль упругости материала упругого слоя.

Для конструкций из трех панелей с воздушными промежутками имеем 2 резонансные частоты:

$$f_1 = 60 \sqrt{\frac{a + b - \sqrt{(a-b)^2 + 4 \frac{m_1^2 m_3^2}{d_1 d_2}}}{2m_1 m_2 m_3}}; \quad (20)$$

$$f_2 = 60 \sqrt{\frac{a + b + \sqrt{(a-b)^2 + 4 \frac{m_1^2 m_3^2}{d_1 d_2}}}{2m_1 m_2 m_3}}, \quad (21)$$

где $a = \frac{m_3(m_1 + m_2)}{d_1}$; $b = \frac{m_1(m_2 + m_3)}{d_2}$; m_1 , m_2 , m_3 – поверхностные массы панелей; d_1 , d_2 – толщины воздушных промежутков.

Для тройных ограждений с упругими слоями резонансные частоты

$$f_{1,2} = 60 \sqrt{\frac{a+b \pm \sqrt{(a-b)^2 + 4k_1 k_2 m_1^2 m_3^2}}{2m_1 m_2 m_3}}, \quad (22)$$

где $a = k_1 m_3 (m_1 + m_2)$; $b = k_2 m_1 (m_2 + m_3)$; k_1, k_2 – динамические жесткости упругих слоев.

Для конструкций из четырех панелей с тремя упругими слоями или воздушными промежутками резонансные частоты вычисляются из решения кубического уравнения относительно циклической частоты относительно ω^2 [25, 26]:

$$(\omega^2)^3 + b(\omega^2)^2 + c(\omega^2) + d = 0, \quad (23)$$

где

$$b = -\left(\frac{k_1 + k_2}{m_2} + \frac{k_2 + k_3}{m_3} + \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_3}{m_3} \right);$$

$$c = \left(\frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{m_2 m_3} + \frac{k_1 k_3 + k_2 k_3}{m_2 m_4} + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3}{m_1 m_3} + \frac{k_2 k_3}{m_3 \cdot m_4} + \frac{k_1 k_3}{m_1 m_4} + \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} \right);$$

$$d = -k_1 k_2 k_3 \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}{m_1 m_2 m_3 m_4},$$

где m_1, m_2, m_3, m_4 – поверхностные массы панелей; k_1, k_2, k_3 – динамические жесткости упругих слоев.

Решение данного кубического уравнения может быть найдено по формулам Кардано, однако более простым является численное определение собственных частот f_1, f_2, f_3 . Для конструкции с воздушными промежутками динамическая жесткость воздушного промежутка определяется его толщиной:

$$k_{\text{an}} = \frac{E_{\text{a}}}{d} = \frac{\rho_0 c_0^2}{d} = \frac{1,225 \cdot 340^2}{d} = \frac{14 \cdot 10^4}{d}.$$

Для конструкций из пяти панелей с четырьмя упругими слоями могут быть найдены четыре резонансные частоты «масса – упругость – масса» f_1, f_2, f_3, f_4 из численного решения уравнения четвертого порядка относительно ω^2 [25, 26]:

$$(k_1 + k_3 - m_3 \omega^2) a \cdot b \cdot k_1 \cdot k_4 - (k_1 - m_1 \omega^2) b \cdot k_2^2 \cdot k_4 - (k_4 - m_5 \omega^2) a \cdot k_1 \cdot k_3^2 = 0, \quad (24)$$

$$\text{где } a = (k_1 + k_2 - m_2 \omega^2) \frac{k_1 - m_1 \omega^2}{k_1} - k_1; b = (k_3 + k_4 - m_4 \omega^2) \frac{k_4 - m_5 \omega^2}{k_4} - k_4,$$

где m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 – поверхностные массы панелей; k_1, k_2, k_3, k_4 – динамические жесткости упругих слоев.

В наших последних работах [24, 25, 26] показаны аналитические и численные решения задачи определения резонансных частот на примере многослойных светопрозрачных конструкций.

4. Расчет звукоизоляции многослойной конструкции ведется через определение инерционных τ_f и резонансных τ_r коэффициентов прохождения звука через многослойную конструкцию с учетом резонансных частот «масса – упругость – масса». Следует отметить, что для конструкций с большим количеством слоев наибольшее значение для звукоизоляции имеет первая резонансная частота «масса – упругость – масса». Имеет значение и жесткость элементов каркаса или подвесов, соединяющих конструктивные слои. Если она меньше или сопоставима с жесткостью упругого слоя или воздуха, то влиянием подвесов можно пренебречь, но если жесткость подвесов значительно выше, то следует вычислять также коэффициенты прохождения энергии изгибных волн из панели в панель через элемент каркаса τ_k .

Звукоизоляция многослойной конструкции с учетом передачи звука через каркас находится следующим образом: $R = -10\lg(\tau_f + \tau_r + \tau_k)$.

Инерционные коэффициенты прохождения через многослойные конструкции вычисляются в третьоктавных полосах в частотных поддиапазонах.

1. Область резонансов типа «масса – упругость – масса».

2. Область выше резонансной частоты начинается:

а) для конструкций с двумя панелями и упругим слоем – с полосы, расположенной на треть октавы выше резонансной частоты f_o ;

б) для конструкций с тремя панелями и двумя упругими слоями – на треть октавы выше второй резонансной частоты f_2 ;

в) для конструкций с 4–5 панелями и упругими слоями между ними – на треть октавы выше среднегеометрической частоты резонансов $f_{cr} = \sqrt[3]{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3}$ или $f_{cr} = \sqrt[4]{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4}$.

Для тонких конструкций данная область распространяется до критической частоты панели, обращенной в изолируемое помещение.

Резонансные коэффициенты прохождения вычисляются в 3 поддиапазонах:

– область ниже критической частоты $f < f_c$;

– область критической частоты $f = f_c$;

– область выше критической частоты $f > f_c$.

Значения коэффициентов прохождения могут вычисляться по формулам, приведенным в работах [24, 25], с учетом коэффициентов общих потерь в конструкциях η_{tot} , которые по измерениям времени структурной реверберации имеют значения от 0,02 (при интенсивном оттоке энергии в примыкающие конструкции) до 0,001 (потери собственно в конструкционном материале).

Итогом предыдущих вычислений являлось определение звукоизолирующей способности одно- и многослойной конструкции без учета косвенной (по воздушным путям) или структурной звукопередачи по примыкающим конструкциям.

Модели прохождения звука через ограждения с учетом косвенной и структурной звукопередачи

Расчет звукоизоляции с учетом косвенной звукопередачи по воздушным каналам требует предварительно полученных частотных характеристик приве-

денной разности уровней звукового давления D_n по ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012². Воздушный канал может представлять собой щели в притворах дверей, отверстия в стене, воздуховоды, воздухообменные устройства и рассматривается как «малый технический элемент» малой площади, акустические характеристики которого зависят от целого ряда параметров, связанных с формой, размерами и материалами. Для некоторых простейших «малых технических элементов» звукоизоляция воздушного канала может быть рассчитана, но для более сложных воздушных каналов она должна быть измерена в реверберационных камерах, в проеме между которыми имеется стена с высокой звукоизоляцией и с исследуемым элементом косвенной звукопередачи. Звукоизоляция ограждающей конструкции с воздушным каналом будет равна

$$R_{w(\text{ок+вк})} = 10 \lg \frac{\frac{S_{\text{ок}}}{S_{\text{ок}} + 10^{(1-0,1D_{nw})}}}{10^{0,1R_{\text{вок}}}}, \quad (25)$$

где $R_{w(\text{ок+вк})}$ – звукоизоляция ограждающей конструкции с малым техническим элементом (воздушным каналом); $R_{\text{вок}}$ – звукоизоляция глухой ограждающей конструкции без воздушных каналов.

Пример влияния воздушного канала (воздухообменного устройства) на звукоизоляцию ограждения показан в работе [27]: отверстие диаметром 125 мм в стене, начиная с частот 250 Гц, снижает звукоизоляцию, и это снижение составляет до 18 дБ на частоте 3150 Гц. При формировании программного комплекса для расчетов звукоизоляции нужно создать отдельный блок вычисления приведенной разности уровней звукового давления D_n и суммарной звукоизоляции ограждения, а также базу данных по звукоизоляционным характеристикам наиболее широко распространенных воздушных каналов в гражданских зданиях.

Расчет звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи представляет собой более сложную задачу, поскольку включает в себя расчеты параметров передачи энергии звуковой вибрации между связанными панелями. В общем виде в строительных конструкциях распространяются изгибные, продольные и сдвиговые волны, которые преобразуются друг в друга в каждом стыке. Однако в фрагменте здания, состоящем из двух помещений и 11 ограждающих их конструкций, влиянием продольных и сдвиговых волн можно пренебречь и учитывать только изгибные колебания конструкций. Данная задача может быть решена с использованием методики ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012, а в качестве расчетной модели может быть использована схема ниже (рис. 2).

В этой схеме есть 2 помещения и 11 панелей, разделяльным элементом является панель 6, исключается энергетический обмен с панелями 1 и 11, нет и энергетического обмена боковых конструкций между собой в одном помещении. Панель 6 может иметь плавающие полы и/или звукоизолирующие потолки с дополнительной звукоизоляцией $\Delta R_{6,1}$ и $\Delta R_{6,2}$ к звукоизоляции несущей панели $R_{6,0}$. Каждая примыкающая конструкция имеет звукоизоляцию: R_i в по-

² ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012. Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции воздушного шума. Москва : Стандартинформ, 2013. 21 с.

мешении с источником звука и R_j – в изолируемом помещении. Звукоизоляция конструкции 6 с учетом структурной звукопередачи может быть вычислена следующим образом:

$$R' = -10 \lg \left[10^{-0,1R_6} + \sum_{i=2}^5 \left[10^{-0,1R_{i,6}} + 10^{-0,1R_{6,j}} + 10^{-0,1R_{i,j}} \right] \right], \quad (26)$$

где $R_6 = R_{6,0} + \Delta R_{6,1} + \Delta R_{6,2}$ – звукоизоляция разделительного элемента (стены, перекрытия) с дополнительными слоями; $R_{i,j}$ – изоляция структурной звукопередачи по трем основным путям прохождения звуковой вибрации.

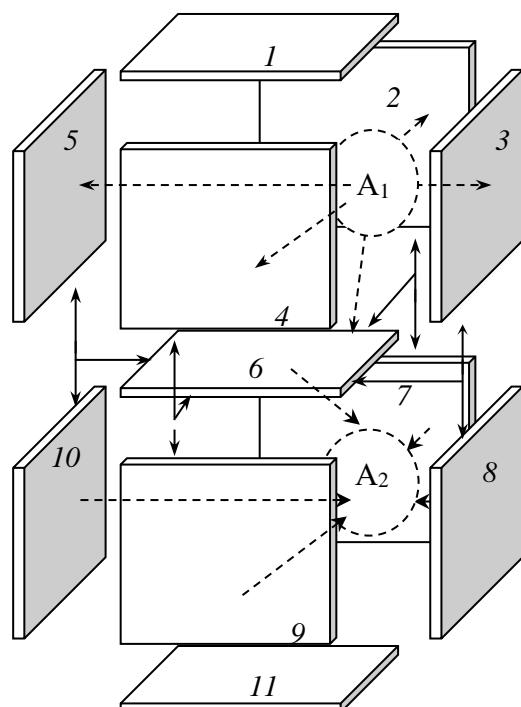


Рис. 2. Модель прямой и структурной звукопередачи между двумя помещениями по ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012

Fig. 2. Schematic of direct and structured sound transmission between two rooms according to GOST R EN 12354-1-2012

В формуле (26) $j = i + 4$. Для всех прымывающих конструкций звукоизоляция несущих панелей R_i обозначена с индексами $i = 2, 3, 4, 5$ в верхнем помещении с источником звука и R_j с индексами $j = 7, 8, 9, 10$ в изолируемом нижнем помещении. Звукоизоляция этих прымывающих конструкций также может быть усиlena дополнительными слоями ΔR_i и ΔR_j .

Изоляция структурной звукопередачи стыками конструкций определяется по формуле

$$R_{ij} = \frac{R_i}{2} + \Delta R_i + \frac{R_j}{2} + \Delta R_j + K_{ij} - 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} + 10 \lg \frac{S_6}{\sqrt{S_i S_j}}, \quad (27)$$

где K_{ij} – индекс снижения вибрации; l_{ij} – длина стыка между конструкциями i и j .

$$a = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_o T_{si}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \approx \frac{2S_i}{T_{si}\sqrt{f}}, \quad (28)$$

где a – эквивалентная длина поглощения конструкций i или j ; S – площадь конструкции i или j ; T_{si} – время структурной реверберации i конструкции.

Индексы снижения вибрации K_{ij} соединений конструкций определяют в соответствии с ГОСТ Р ИСО 10848-1–2012³ в лабораторных условиях. Индекс K_{ij} для стыков однородных панелей может быть вычислен через коэффициент прохождения энергии изгибной волны τ_{ij} :

$$K_{ij} = -10 \lg \tau_{ij} - 15 \lg f_{ci} = -10 \lg \tau_{ji} - 15 \lg f_{cj}, \quad (29)$$

где f_c – критическая частота конструкций i или j .

Для ряда стыков наиболее широко применяемых конструкций в ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012 (прил. Е) они даны в виде эмпирических формул в зависимости от отношения поверхностных масс сопрягаемых элементов и конфигурации стыков. Характеристики изоляции дополнительными слоями (обшивками) ΔR_i могут быть определены по прил. D в зависимости от резонансной частоты «масса – упругость – масса» и собственной звукоизоляции несущей конструкции.

Методика ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012 схожа с методикой расчета звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи В.И. Зaborова [15], и с ее помощью с некоторым приближением могут быть определены и уровни звукового давления в приемном помещении при заданных уровнях шума в помещении с источником.

Расчеты уровней звукового давления в смежном и удаленном помещении и виброускорений на панелях могут быть выполнены с использованием модели, построенной на методе статистического энергетического анализа (СЭА). Каждая конструкция и помещение рассматриваются как подсистема, имеющая достаточно большое количество собственных форм колебаний в рассматриваемой полосе частот, энергообмен между подсистемами может быть записан в виде уравнений энергетического баланса с учетом перетока энергии между подсистемами и преобразования в стыках изгибных, продольных и сдвиговых волн. В качестве расчетной модели наибольший интерес представляет фрагмент здания из 3 помещений и 16 ограждающих их панелей (рис. 3).

В расчетной модели фрагмента здания каждая панель представляет собой 3 подсистемы с энергией изгибных, продольных и сдвиговых волн. Каждое по-

³ ГОСТ Р ИСО 10848-1–2012. Акустика. Лабораторные измерения косвенной передачи воздушного и ударного шума между смежными помещениями. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2013. 36 с.

мещение – это подсистема, также имеющая спектр собственных колебаний звуковых волн в воздухе. Источники звука могут вносить энергию в любую подсистему-помещение. Источники вибрации могут вносить энергию в подсистемы изгибных колебаний панелей. В некотором приближении можно упростить систему, оставив в ней только подсистемы изгибных колебаний панелей, однако такое упрощение возможно только для фрагмента из двух помещений и 11 панелей, при увеличении расчетного фрагмента существенное влияние на энергетический баланс оказывают сдвиговые и продольные волны.

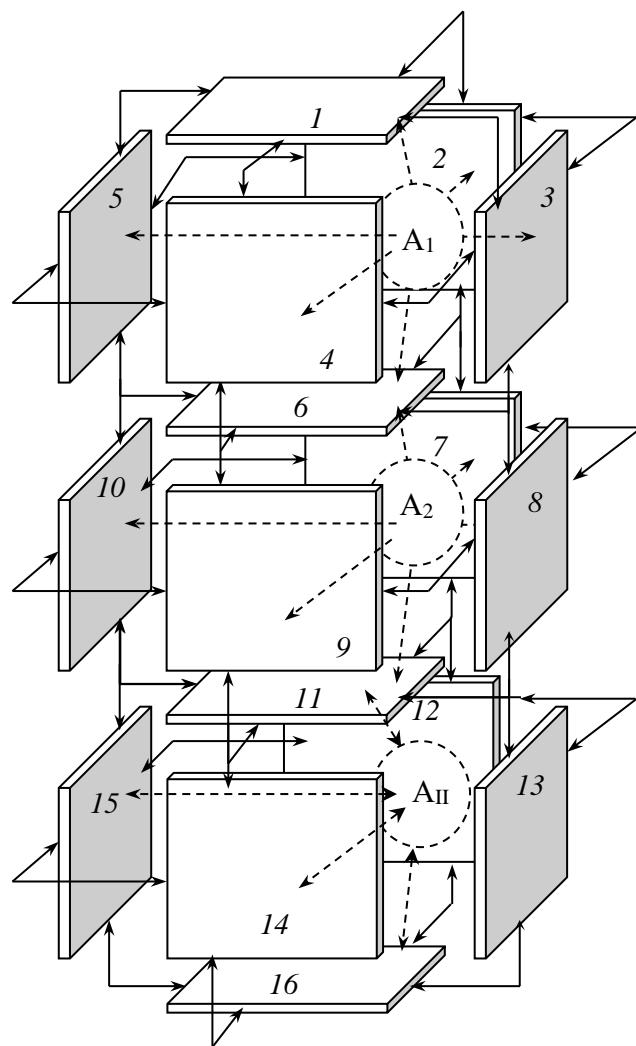


Рис. 3. Расчетная схема фрагмента здания, состоящего из 3 помещений и ограждающих их 16 панелей по методу СЭА

Fig. 3. Calculation diagram of a building fragment consisting of 3 rooms and 16 enclosing panels using statistical energy-dispersive analysis

Квазипродольные и сдвиговые волны в массивных конструкциях также имеют существенное значение в связи с их вкладом в излучение звука в поме-

щение на высоких частотах. В классическом варианте СЭА энергетический обмен между помещениями и конструкциями рассматривается только для резонансных форм колебаний конструкций, а вынужденная (нерезонансная) звукопередача представляется непосредственной энергетической связью между смежными помещениями [20, 21, 22]. В зданиях с массивными ограждениями нерезонансная звукопередача влияет на результаты расчета только в области низких частот, и ею в какой-то мере можно пренебречь, но если конструкции легкие со значениями критической частоты в области высоких частот, то нерезонансная звукопередача существенно снижает звукоизоляцию практически во всем диапазоне частот.

В уравнениях энергетического баланса учесть нерезонансную звукопередачу можно, разложив коэффициенты энергетической связи на инерционные и резонансные, например, между помещением и панелью $\eta_{k,i} = \eta_{k,i}^f + \eta_{k,i}^r$ или от панели к помещению $\eta_{i,k} = \eta_{i,k}^f + \eta_{i,k}^r$. Коэффициенты резонансной энергетической связи между помещениями и панелями можно записать известными формулами через коэффициенты излучения свободных волн [22].

От панели i к помещению k

$$\eta_{i,k}^r = \frac{\rho \cdot c}{2\pi \cdot f \cdot m_i} \sigma_i^r, \quad (30)$$

и, наоборот, коэффициент резонансной энергетической связи от помещения k к панели i получим, используя соотношение

$$\eta_{k,i}^r = \eta_{i,k}^r \frac{n_i}{n_k}, \quad (31)$$

где n_i и n_k – плотности мод собственных колебаний связанных элементов системы соответственно панелей и помещений; $\eta_{i,k}^r$ и $\eta_{k,i}^r$ – резонансные коэффициенты энергетической связи от панели к помещению и, наоборот, от помещения к панели.

Плотности мод колебаний в единичной полосе круговых частот в панели

$$n_i = \frac{S_i \cdot f_{ci}}{2c_o^2} \quad (32)$$

и в объеме помещения

$$n_k = \frac{2f^2 \cdot V_k}{c_o^3}. \quad (33)$$

Тогда коэффициент резонансной связи от помещения к панели

$$\eta_{k,i}^r = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S_i \cdot f_{ci}}{8\pi \cdot f^3 \cdot m_i \cdot V_k} \sigma_i^r.$$

Коэффициент нерезонансной энергетической связи от панели к помещению определяется в зависимости от коэффициента излучения вынужденных волн [23]:

$$\eta_{i,k}^f = \frac{\rho \cdot c_o}{2\pi \cdot f \cdot m_i} \sigma_i^f. \quad (34)$$

Нерезонансный коэффициент энергетической связи от помещения к панели вычислим через импеданс изгибных колебаний панели [23]:

$$\eta_{k,i}^f = \frac{2\rho \cdot c_o^2 \cdot m_i \cdot S_i}{|Z_{wi}|^2 V_k} \eta_i, \quad (35)$$

где импеданс панели определим с учетом циклической частоты, изгибной жесткости, поверхностной массы и коэффициента потерь панели [13]:

$$|Z_{wi}|^2 = \left((1 + \eta_i) m_i \cdot \omega + \frac{B_i}{\omega} \left(\frac{\omega}{c} \right)^4 \right)^2. \quad (36)$$

Коэффициенты энергетической связи между подсистемами изгибных, продольных и сдвиговых колебаний панелей определим по формулам [18]:

$$\eta_{ij}^{bm} = \frac{2}{\pi} \frac{L_{ij}}{S_i} \frac{\tau_{ij}^{bm}}{k_{bi}}; \quad (37)$$

$$\eta_{ij}^{lm} = \frac{1}{\pi} \frac{L_{ij}}{S_i} \frac{\tau_{ij}^{lm}}{k_{li}}; \quad (38)$$

$$\eta_{ij}^{sm} = \frac{1}{\pi} \frac{L_{ij}}{S_i} \frac{\tau_{ij}^{sm}}{k_{si}}, \quad (39)$$

где $m = b, l, s$ – индекс, указывающий на тип прошедшей или отраженной волны; L_{ij} – длина стыка между i -й и j -й панелями; $\tau_{ij}^{bm}, \tau_{ij}^{lm}, \tau_{ij}^{sm}$ – соответственно средние по углу падения коэффициенты прохождения энергии падающих изгибных, продольных и сдвиговых волн в энергию типа « m », определяемые из расчета вибропропускания стыков [18]; k_{bi}, k_{li}, k_{si} – волновые числа изгибной, продольной и сдвиговой волн в i -й панели.

Как можно обнаружить, коэффициенты энергетической связи между панелями не нужно делить на инерционные и резонансные составляющие, однако в расчетах следует избегать использование соотношения плотностей мод колебаний вида (31), предназначенного только для резонансных форм колебаний. Вычислять коэффициенты энергетической связи будем только по формулам (37) – (39) для соответствующих пар конструкций.

Вычислив значения коэффициентов энергетической связи для фрагмента здания из 3 помещений и 16 панелей (рис. 2), можем сформировать уравнения энергетического баланса для каждого элемента. Всего получим систему из 51 линейного алгебраического уравнения, вид которых дан в монографии [18]. Решение системы уравнений при заданной мощности источников звука и/или вибрации относительно неизвестных значений звуковой энергии в помещении E_k^A и энергии изгибных E_i^b , продольных E_i^l и сдвиговых E_i^s волн в панелях в полосах частот позволит определить уровни звукового давления в помещениях:

$$L_k = 10 \lg \frac{E_k^A \cdot c_o}{I_o \cdot V_k}, \quad (40)$$

где $I_o = 10^{-12}$ Вт/м² – пороговое значение интенсивности,

Можно также определить среднеквадратическое значение виброускорения на панелях:

$$a_i^2 = \frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{n} = \frac{\omega^2 \cdot E_i^b}{\rho_i \cdot h_i \cdot S_i}. \quad (41)$$

Общий алгоритм расчета звукоизоляции, уровней звукового давления в помещениях и виброускорений на панелях

Для многих задач обоснования проектных решений является достаточным расчет индексов изоляции воздушного шума в зависимости от конструктивного исполнения ограждения. В помощь проектировщику нужна достаточно простая компьютерная программа 1-го уровня сложности, которая включает в себя 4 блока.

1. Описания типа ограждающей конструкции (рис. 1), геометрических и физических параметров конструктивных элементов, что целесообразно совместить с выбором из меню характеристик имеющихся на рынке материалов.
2. Расчеты поверхностных масс панелей в составе конструкции и резонансных частот: критической частоты панелей, частот «масса – упругость – масса».
3. Расчеты коэффициентов излучения вынужденных и свободных волн, определение коэффициентов инерционного и резонансного прохождения звука через конструкции в зависимости от их типа.
4. Вычисление индексов изоляции воздушного шума R_w или $R_{A\text{тран}}$ с учетом приведения к оценочным частотным характеристикам.

В ряде случаев возникает необходимость определить звукоизоляцию ограждающей конструкции, разделяющей два смежных помещения, с учетом косвенной и/или структурной звукопередачи. Эта необходимость возникает в случае устройства легких, в том числе многослойных, перегородок по монолитной плите перекрытия и в случае, если примыкающие ограждающие конструкции значительно отличаются по поверхностной массе.

Алгоритм расчета 2-го уровня сложности включает в себя ряд шагов.

1. Описание типов ограждающих конструкций, составляющих расчетную модель на рис. 1, геометрических и физических параметров конструктивных элементов каждого ограждения.
2. Расчеты звукоизоляции самой ограждающей конструкции и примыкающих к ней конструкций со стороны помещения с источником звука и смежного помещения. Если конструкции многослойные, то для упрощения задачи вычисляются частотные значения звукоизоляции несущих однородных панелей и величины усиления звукоизоляции дополнительными слоями ΔR_i .
3. Расчеты звукоизоляции ограждающей конструкции с учетом косвенной звукопередачи по воздушным путям.
4. Расчеты индексов снижения вибрации между панелями K_{ij} и значений звукоизоляции по путям передачи звука через стыки конструкций R_{ij} .

5. Расчет звукоизоляции с учетом структурной звукопередачи R' по формуле (26).

6. Вычисление индекса изоляции воздушного шума с учетом структурной звукопередачи R_w' .

В случае если в здании находятся помещения с высокими уровнями звука или имеется виброактивное оборудование, передающее возбуждение изгибных колебаний на одно или несколько ограждений, то необходимо выполнить вычисления уровней звукового давления не только в смежном, но и в удаленном помещении. Для этой цели применяется алгоритм 3-го уровня сложности с использованием методологии СЭА по схеме на рис. 3.

1. Описание расчетного фрагмента здания (рис. 3): геометрических и акустических параметров помещений, геометрических параметров конструкций и их физических характеристик. Описание конструктивного исполнения стыков, их геометрии и характеристик материалов заполнения стыков. Описание конструкций целесообразно из вариантов типовых решений. Задание мощностей источников звука и вибрации.

2. Расчеты коэффициентов прохождения волн трех типов через стыки конструкций τ_{ij}^{bm} , τ_{ij}^{lm} , τ_{ij}^{sm} с учетом их преобразования, вычисление коэффициентов энергетической связи между конструкциями.

3. Расчеты коэффициентов инерционной и резонансной энергетической связи между помещениями и конструкциями.

4. Построение матриц системы уравнений энергетического баланса для 3 помещений и 16 конструкций, решение системы уравнений в октавных или третьоктавных полосах частот относительно неизвестных значений энергии в подсистемах.

5. Вычисление уровней звукового давления в помещениях и виброускорений на панелях.

Общий алгоритм расчета звукоизоляции и уровней шума и вибрации формирует расчетные блоки программного комплекса. Для его практического использования потребуется тестирование по результатам измерений на различных конструкциях в лабораторных и натурных условиях.

Общая схема организации программных компонентов

Проектируемый программный комплекс для решения поставленных задач вычисления звукоизолирующей способности, фактической звукоизоляции и уровней звука и вибрации представляет собой совокупность модулей, предполагающих акцент на подготовку исходных данных, предобработку и вывод итоговой расчетной модели. Исходя из поставленной задачи разработать программное решение с низким порогом входа было принято решение разделить разрабатываемое средство моделирования на два базовых модуля: визуальный конструктор сцены, предоставляющий простой и наглядный способ конфигурирования исходных параметров модели, и сервер расчетов, способный в режиме пакетной обработки обслуживать множество запросов от пользователей.

Архитектурно данное решение можно свести к классической модели клиент-серверного взаимодействия, где тонкий клиент, выполненный в виде веб-

приложения, позволяет специалисту визуально задать характеристики фрагмента здания. Клиент, представленный визуальным конструктором, взаимодействует с сервером расчетов посредством http-запросов через набор публичных API (интерфейс программирования приложений – Application Programming Interface), предоставляющих доступ к формированию, запуску и отслеживанию результатов выполнения расчетных задач. Такая модель позволяет выстроить очередь исполнения для равномерного разделения вычислительных ресурсов между множеством пользователей.

Визуальный конструктор разработан в виде приложения Vue/Vite и доступен в браузере пользователя. В основе блока рендера используется библиотека tree.js, что предоставляет пользователю различные режимы 3D-визуализации и дает возможность оценить конфигурацию на соответствие целевой задаче. После периода первоначальной загрузки исходного кода конструктор автоматически запускается и предоставляет пользователю интерактивный интерфейс для внесения размеров и прочих характеристик фрагмента здания для модели расчета. По готовности пользователь инициирует отправку расчетной задачи на сервер посредством API-вызыва, что позволяет запустить расчетный модуль и получить уведомление о готовности результатов.

Ключевой особенностью визуального конструктора является параметрическая модель, позволяющая задать размеры двух смежных комнат, характеристики перекрытий и ограждающих конструкций.

Интерфейс конфигуратора позволяет задать исходные размеры и общие параметры панелей. В зависимости от исследуемой модели может быть выбрана конфигурация с едиными монолитными панелями или вариант с отдельными панелями, разделенными прокладкой. В предлагаемой параметрической панели для модели из двух помещений присутствуют 11 панелей и 26 упругих прокладок между ними. В зависимости от поставленной задачи число прокладок может меняться. Так, в случае с монолитной плитой будут отсутствовать прокладки между двумя верхними и двумя нижними панелями.

Вариант визуализации фрагмента здания из двух помещений с монолитными перекрытиями представлен на рис. 3.

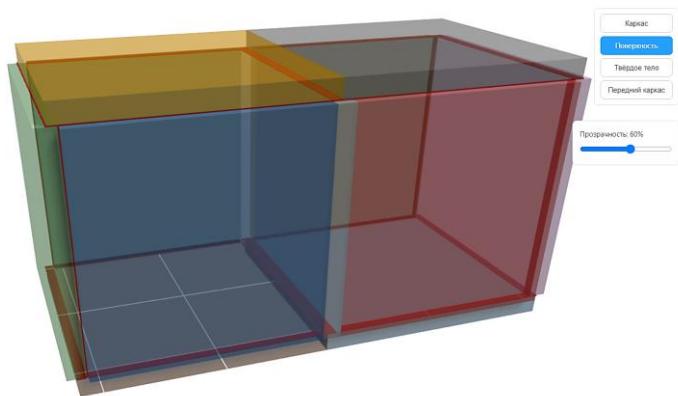


Рис. 3. Визуализация смежных помещений в режиме 60 % прозрачности
Fig. 3. Adjacent rooms visualized in 60% transparency mode

Параметрическая панель инструментов позволяет задавать общие геометрические характеристики для смежных помещений в рамках исследуемого фрагмента здания. Выбор конкретной панели для настройки ее геометрических и невизуальных свойств осуществляется с помощью мыши. При этом для трехмерной визуализации автоматически выбирается передняя панель (расположенная ближе всего к камере).

Чтобы настроить стык между панелями, необходимо последовательно выбрать две смежные панели. Это действие открывает доступ к панели параметров, где можно задать жесткость упругих элементов в стыке.

Сервер расчетов представляет собой приложение на языке Python 3, использующее библиотеку FastAPI для предоставления публичного API в соответствии с концепцией REST. Генерация графиков для визуализации использует библиотеку matplotlib, а для вывода табличных данных применяется библиотека prettytable. Расчетный модуль также написан на языке Python 3 и осуществляет математическое моделирование для одиночной расчетной задачи благодаря библиотекам математических структур и алгоритмов питчу и scipy. Поскольку расчетный модуль выполнен отдельным компонентом, предполагается запуск множества отдельных экземпляров и использование очереди задач для получения исходных параметров модели и возврата результата. Таким образом, один экземпляр сервера API и пул расчетных модулей может обслуживать запросы множества пользователей.

В начале работы пользователь открывает страницу сервиса и загружает в браузер веб-приложение – визуальный конструктор. После определения геометрических и невизуальных параметров модели пользователь может инициировать запуск расчетов, а по готовности получить уведомление и результаты расчетов, оформленные в виде таблиц и графиков. Для удобства пользователя результаты работы могут быть экспортированы в формате PDF.

Заключение

Для практики проектирования звукоизоляции в зданиях целесообразно создание программного комплекса, который предусматривает 3 уровня сложности задач в зависимости от конструктивной схемы здания, типа ограждающих конструкций и наличия мощных источников звука и вибрации, воздействие которых может приводить к высоким уровням звука и вибрации в смежных и удаленных помещениях.

В составе программного комплекса разработан ряд алгоритмов для решения следующих задач:

- а) определение собственной звукоизолирующей способности одно- и многослойных ограждений;
- б) расчет звукоизоляции с учетом косвенной и структурной передачи звука в смежное помещение;
- в) расчет параметров прохождения волн трех типов через стыки строительных конструкций, формирование расчетных матриц и вычисление уровней звука и вибрации в смежных и удаленных помещениях с учётом инерционной и резонансной звукопередачи.

Тестирование отдельных блоков и программного комплекса в целом по результатам измерений для конкретных конструкций и планировочных решений в перспективе позволит вывести этот продукт на рынок проектной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Cremer L.* Theorie der Schall dummung dunner Wande bei Schragen Einfall // Akustische Zeitschrift. 1942. № 7. S. 81–104.
2. Седов М.С. Звукоизоляция тонких однослойных пластин ограниченных размеров // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1964. № 5. С. 130–134.
3. Седов М.С. Звукоизоляция // Техническая акустика транспортных машин. Санкт-Петербург : Политехника, 1992. С. 68–106.
4. Бобылев В.Н., Тищков В.А., Монич Д.В. Изоляция воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2014. 67 с. ISBN 978-5-528-00004-6.
5. Sewell E.C. Transmission of Reverberant Sound through a Single-Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle // J. of Sound and Vibration. 1970. V. 12. P. 21–32.
6. Maidanik G. Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields // J. of the Acoustical Society of America. 1962. V. 34. P. 809–826.
7. Josse R., Lamure J. Transmission du son par une paroi simple // Acustica. 1964. P. 266–280.
8. Wallace C.E. Radiation resistance of rectangular plate // J. of the Acoustical Society of America. 1972. V. 51. P. 946–952.
9. Lepington F.G., Broadbent E.G., Heron K.H. The acoustic radiation efficiency of rectangular panels // Proceedings of the Royal Society of London, A382. 1982. P. 45–71.
10. London A. Transmission of reverberant sound through double walls // J. Acoust. Soc. Amer. 1950. V. 22. P. 270–279.
11. Gosele K. Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen // Acustica. 1980. № 45. S. 208.
12. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements // Applied Acoustics. 2012. V. 73. P. 575–589.
13. Rindel J.H. Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis Group, LLC., 2018. 476 p. DOI: 10.1201/9781351228206
14. Westphal W. Ausbreitung vor Körperschall in Gebäuden // Acustica. 1957. V. 7. S. 335–348.
15. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. Москва : Стройиздат, 1969. 185 с.
16. Бородицкий Л.С., Спиридовон В.М. Снижение структурного шума в судовых помещениях. Ленинград : Судостроение, 1974. 221 с.
17. Lyon R.H., Maidanik G. Power flow between linearly coupled oscillators // J. of the Acoustical Society of America. 1962. V. 34. № 5. P. 623–639.
18. Овсянников С.Н. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2000. 378 с.
19. Овсянников С.Н., Лелюга О.В. Основные принципы расчета звукопередачи в зданиях методом СЭА. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2023. 160 с.
20. Craik R.J.M. Sound transmission through buildings using statistical energy analysis // Gower. 1996. 280 p.
21. Hopkins C. Sound insulation. Oxford, Burlington (MA) : Butterworth-Heinemann, 2007. 622 p. ISBN 978-7506-6526-1.
22. Crocker M.J., Price A.J. Sound transmission using statistical energy analysis // Journal of Sound and Vibration. 1969. V. 9. № 3. P. 469–486.
23. Овсянников С.Н. Развитие методологии расчета звукоизоляции с использованием метода статистического энергетического анализа // Строительство и реконструкция. 2025. № 4. С. 41–51. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-41-51
24. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукоизоляция однослойных остеклений, одно- и двухкамерных стеклопакетов // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-12-17

25. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С., Шубин И.Л. Звукоизоляция многослойных остеклений в раздельных переплетах // Жилищное строительство. 2024. № 12. С. 20–28. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-12-20-28
26. Овсянников С.Н. Резонансы многослойных светопрозрачных конструкций // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : материалы XV Международной научно-практической конференции. Томск, 12–14 марта 2025 г. В 2 частях. Часть 2. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2024. С. 412–421.
27. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукопередача через ограждения с малыми техническими элементами, включая воздухообменные устройства // Строительство и реконструкция. 2024. № 5. С. 31–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-31-43

REFERENCES

1. Cremer L. Theorie der Schall dummung dunner Wande bei Schragen Einfall. *Akustische Zeitschrift*. 1942; (7): 81–104.
2. Sedov M.S. Sound Insulation of Thin Single-Layer Plates of Limited Dimensions. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1964; (5): 130–134 (In Russian)
3. Sedov M.S. Sound insulation. Handbook "Technical acoustics of transport vehicles". Chapter 4. I. Ivanov, Ed. Saint-Petersburg: Politekhnika, 1992. Pp. 68–106. (In Russian)
4. Bobylev V.N., Tishkov V.A., Monich D.V. Isolation of Air Noise by Single-Layer Enclosing Structures. Nizhny Novgorod, 2014. 67 p. ISBN 978-5-528-00004-6. (In Russian)
5. Sewell E.C. Transmission of Reverberant Sound through a Single-Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle. *Journal of Sound and Vibration*. 1970; 12 (1): 21–32.
6. Maidanik G. Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1962; 34 (6): 809–826.
7. Josse R., Lamure J. Transmission du son par une paroi simple. *Acustica*. 1964; 266–280.
8. Wallace C.E. Radiation resistance of Rectangular Plate. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1972; 51: 946–952.
9. Leppington F.G., Broadbent E.G., Heron K.H. The Acoustic Radiation Efficiency of Rectangular Panels. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1982; A382: 45–71.
10. London A. Transmission of Reverberant Sound Through Double Walls. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1950; 22 (2): 270–279.
11. Gosele K. Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen. *Acustica*. 1980; 45: 208.
12. Kurra S. Comparison of the Models Predicting Sound Insulation Values of Multilayered Building Elements. *Applied Acoustics*. 2012; 73: 575–589. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.11.008
13. Rindel J.H. Sound Insulation in Buildings. Taylor & Francis Group. 2018. 476 p. DOI: 10.1201/9781351228206
14. Westphal W. Ausbreitung vor Körperschall in Gebäuden. *Acustica*. 1957; 7: 335–348.
15. Zaborov V.I. Theory of Sound Insulation of Enclosing Structures, 2nd edn. Moscow: Stroyizdat, 1969. 185 p. (In Russian)
16. Boroditsky L.S., Spiridonov V.M. Reduction of Structural Noise in Ship Premises. Leningrad: Sudostroenie, 1974. 221 p. (In Russian)
17. Lyon R.H., Maidanik G. Power Flow Between Linearly Coupled Oscillators. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1962; 34 (5): 623–639.
18. Ovsyannikov S.N. Propagation of Sound Vibration in Civil Buildings. Tomsk: TSUAB, 2000. 378 p. (In Russian)
19. Ovsyannikov S.N., Lelyuga O.V. Basic Principles of Calculating Sound Transmission in Buildings by the SEA Method. Tomsk: TSUAB, 2023. 160 p. (In Russian)
20. Craik R.J.M. Sound Transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis. Gower. 1996. 280 p.
21. Hopkins C. Sound Insulation. Routledge; 1st edn. 2007. 648 p. ISBN 978-0-7506-6526-1.5. (In Russian)
22. Crocker M.J., Price A.J. Sound Transmission using Statistical Energy Analysis. *Journal of Sound and Vibration*. 1969; 9 (3): 469–486.

23. *Ovsyannikov S.N. Methodology Development for Calculating Sound Insulation using Statistical Energy Analysis. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya.* 2025; (4): 41–51. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-41-51 (In Russian)
24. *Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound Insulation of Single-Layer Glazing, Single- and Double-Glazed Windows. Zhilishchnoe stroitel'stvo.* 2023; (12): 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-12-17 (In Russian)
25. *Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S., Shubin I.L. Sound Insulation of Multilayer Glazing in Separate Bindings. Zhilishchnoe stroitel'stvo.* 2024; (12): 20–28. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-12-20-28 (In Russian)
26. *Ovsyannikov S.N. Resonances of Multilayer Translucent Structures. In: Investments, urban planning, technologies as drivers of socio-economic development of the territory and improvement of the quality of life of the population. Part 2. Tomsk, 2024. Pp. 412-421. (In Russian)*
27. *Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound Transmission Through Fences with Small Engineering Elements, Including Air Exchange Devices. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya.* 2024; (5): 31–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-31-43 (In Russian)

Сведения об авторах

Овсянников Сергей Николаевич, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, Соляная, 2; гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, ovssn@tsuab.ru

Овсянников Михаил Сергеевич, ст. преподаватель, Научно-исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, michael.ovsyannikov@gmail.com

Authors Details

Sergei N. Ovsyannikov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; Research Institute of Structural Physics, 21, Lokomotivnyi Proezd, 127238, Moscow, Russia, ovssn@tsuab.ru

Mikhail S. Ovsyannikov, Senior Lecturer, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, michael.ovsyannikov@gmail.com

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 15.11.2025
Одобрена после рецензирования 24.11.2025
Принята к публикации 24.11.2025

Submitted for publication 15.11.2025
Approved after review 24.11.2025
Accepted for publication 24.11.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 141–156.

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 (6): 141–156.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.328.1:693.557

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-141-156

EDN: CULJAW

ДЕФЕКТОСКОПИЯ БЕТОНА КОНСТРУКЦИЙ С ВНЕШНЕЙ СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКОЙ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В МАТЕРИАЛЕ

Пётр Дмитриевич Арленинов

*Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева, АО НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия
Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия*

Аннотация. Актуальность. Рассматривается проблема отсутствия апробированных методик неразрушающего контроля качества бетона в конструкциях, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом (трубобетонные колонны, конструкции с внешним листовым армированием и несъемной опалубкой). Существующие методы, такие как визуальный контроль с помощью камер, обладают существенными недостатками, включая субъективность, технологические ограничения и невозможность проверки уже возведенных конструкций.

Цель. Разработка и экспериментальная апробация методики неразрушающего тепловизионного контроля сплошности бетона в композитных конструкциях со стальной облицовкой.

Материалы и методы. В качестве решения предлагается инновационная методика, основанная на тепловизионном контроле внешней поверхности стального листа. Ее физическая суть заключается в регистрации тепловизором температурных аномалий, возникающих из-за различной теплопроводности монолитного бетона и дефектов (полости, инородные включения). Метод применяется в двух режимах: пассивном – в период экзотермического тепловыделения при твердении бетона, а также активном – с искусственным нагревом или принудительным охлаждением конструкции для усиления теплового контраста.

Результаты. Методика была успешно апробирована на двух типах реальных конструкций: высотной трубобетонной колонне и армоопалубочном блоке с внешним листовым армированием. В ходе экспериментов, включавших закладку искусственных дефектов, продемонстрирована возможность надежного обнаружения дефектов, расположенных как вплотную к стальному листу, так и на глубине до 10 см. Эффективность метода подтверждена как на пике экзотермии, так и через 60 сут после бетонирования.

Полученные положительные результаты показывают перспективность методики для промышленного применения в качестве надежного инструмента контроля сплошности бетона в сложных композитных конструкциях.

Ключевые слова: внешнее листовое армирование, бетон, железобетон, контроль качества, дефектоскопия, тепловизор

Для цитирования: Арленинов П.Д. Дефектоскопия бетона конструкций с внешней стальной оболочкой на основе законов переноса тепла в материале //

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 141–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-141-156. EDN: CULJAW

ORIGINAL ARTICLE

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE STRUCTURE WITH OUTER STEEL SHELL USING HEAT TRANSFER PRINCIPLES

Petr D. Arleninov

*Research, Development, Design and Engineering Institute
of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia
The National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia*

Abstract. This article addresses the lack of proven non-destructive testing of the concrete quality in structures with an outer steel shell, such as concrete-filled steel tubes and structures with external steel plating or permanent formwork. Such methods as visual monitoring with cameras, have significant drawbacks, including subjectivity, technological limitations, and inability to inspect completed structures.

Purpose: The aim of this work is the development and validation of non-destructive testing of concrete structure with outer steel shell using heat transfer principles.

Methodology/approach: The proposed innovative methodology is based on thermal imaging of the outer steel surface. Its physical principle involves a thermal imager to detect temperature anomalies caused by the different thermal conductivity of solid concrete and defects (voids, inclusions). The method is applied in two modes. The passive mode utilizes exothermic heat releasing during the concrete curing, and the active mode involves the artificial heating or forced cooling of the structure to enhance thermal contrast.

Research findings: The proposed methodology was successfully tested on two types of real structures: a high-rise concrete-filled steel tube column and a wall segment with the outer steel shell plating. Experiments involving artificially created defects demonstrate the reliable flaw detection directly against the steel sheet and at a 10 cm depth. The effectiveness of this method is confirmed both during the peak exothermic reaction and after 60 days of concreting.

Research implication: This methodology can be used in industries as a reliable tool for monitoring the concrete integrity in complex composite structures.

Keywords: outer steel shell, concrete, reinforced concrete, quality control, non-destructive testing, thermal imaging, thermography

For citation: Arleninov P.D. Non-Destructive Testing of Concrete Structure with Outer Steel Shell using Heat Transfer Principles. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 141–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-141-156. EDN: CULJAW

Введение

В 2026 г. в России планируется к выходу первый свод правил по проектированию железобетонных конструкций с внешним листовым армированием, за которым последует уже промышленное применение такой технологии. За рубежом исследования включения листа несъемной опалубки в работу конструкции начались достаточно давно. Такое техническое решение было впер-

ые запатентовано во Франции в 1966 г. Конструкции с внешним листовым армированием начали активно применяться в атомной отрасли [1–5] и в высотном строительстве [6, 7]. Основным преимуществом такой технологии является сокращение сроков строительства; это крайне важно и экономически, и репутационно, поскольку для сложных и уникальных объектов общий срок постройки часто находится в интервале от 5 до 10 лет [8–10]. При этом уменьшение срока бетонных работ может достигать 20–30 %.

В нашей стране непосредственно внешнее листовое армирование не применялось и не применяется до сих пор, поскольку отсутствуют нормы, по которым такие конструкции можно запроектировать, однако начиная с 1960-х гг. начались исследования новых конструктивных решений оболочек АЭС со стальной облицовкой, выполняющей функции несущей арматуры [11–13]. Такая система особенно актуальна для атомной отрасли, поскольку в ряде станционных помещений применение стальной несъемной опалубки продиктовано требованиями радиационной защиты, поэтому включение внешнего стального листа в работу конструкции кажется последовательным решением. Первое применение этой технологии в СССР состоялось при строительстве защитной оболочки реактора пятого блока Нововоронежской АЭС в 1972 г. Она имеет форму цилиндра и выполнена из бетона М400, а с внутренней стороны облицована стальным листом толщиной 6–10 мм. И хотя формально из-за отсутствия норм включать стальной лист в работу конструкции нельзя, при рассмотрении особых предельных состояний у проектировщиков при использовании таких конструктивных решений появляются определенные резервы.

Несмотря на появление данной технологии уже более 50 лет назад, к настоящему моменту апробированных методик контроля качества бетонирования конструкций, поверхность которых закрыта стальным листом, не существует. Это относится к конструкциям с несъемной опалубкой и с внешним листовым армированием. В настоящее время на всех строящихся объектах Росатома, как в России, так и за рубежом, широко применяются конструкции с несъемной опалубкой (в том числе двусторонней) внутри реакторных оболочек. Параллельно ведутся предпроектные работы по внедрению систем внешнего листового армирования – не только для атомных станций, но и в высотном строительстве.

Аналогичная проблема отсутствия апробированных методик контроля качества бетона характерна и для трубобетонных конструкций. Несмотря на длительную историю их исследования и массовое применение в промышленном и гражданском строительстве, данная проблема остается нерешенной как в России, так и за рубежом [14–15].

В разное время предлагались различные способы контроля качества бетона при закрытой сталью наружной поверхности – от ультразвукового до акусто-эмиссионного контроля [16–19], но развитие эти способы пока не получили. Одним из самых простых и старых способов является простукивание с внешней стороны (такой способ применяется при контроле колесных пар поездов), однако он крайне субъективен в части интерпретации дефекта контролером, также он позволяет определить только полости, расположенные вплотную к листу. Единственным применяемым способом контроля на текущий мо-

мент является видеосъемка процесса бетонирования с погружением камеры внутрь несъемной опалубки (трубы) на штанге с постепенным поднятием вместе с наполнением сечения бетоном. Однако, кроме имеющихся достоинств данного способа, очевидны и его недостатки.

1. Субъективность и зависимость от специалиста, осуществляющего работу.
2. Невозможно одновременно качественно выполнить съемку процесса заливки на всех этапах бетонирования со сплошным контролем.

3. Необходимо качественное освещение внутри опалубочной системы, а учитывая возможную высоту армоопалубочного блока (например, на зарубежных строительных площадках высота отдельных блоков, изготовленных на заводе, составляла более 10 м), это может быть сложным для выполнения.

4. Одновременное использование нескольких камер при заливке массивных конструкций. Это усложняет последующий анализ результатов съемки из-за необходимости синхронизации данных с каждой камеры.

5. Сложности контроля на участках с густым армированием, которое может быть в зоне стад-болтов непосредственно у стального листа, а именно в этих местах и возможно образование дефектов при бетонировании.

6. Риск отказа оборудования.

7. При обнаружении проблемы при бетонировании необходимо мгновенное принятие решения о продолжении работ.

8. Невозможно независимо проконтролировать уже залитые конструкции.

В статье [20] ранее была предложена концепция инновационной методики контроля сплошности бетона конструкций, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом как во время бетонирования, так и в любой момент времени, основанная на тепловизионной съемке стального листа с внешней стороны конструкции. В настоящей статье приведены результаты апробации данной методики на двух реальных объектах: трубобетонных колоннах большой высоты и армоопалубочных блоках системы внешнего листового армирования. Кроме того, в исследовании детально описаны физические основы предлагаемого метода контроля.

Методы и материалы

При твердении бетона происходит экзотермическая реакция с выделением тепла в зависимости от количества и качества цемента, используемого в составе бетонной смеси, а также ряда других факторов (параметры сечения конструкции, температура окружающей среды и т. д.). Пик экзотермической реакции наступает на второй-третий день после бетонирования и может достигать 80 °С для массивных конструкций из высокопрочного бетона. При таком тепловыделении для бетонных или железобетонных конструкций, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом, происходит последовательный нагрев сечения конструкции от центра к краю с последующим нагревом металлического листа. В месте возможного дефекта бетонирования внутри конструкции (из-за наличия полостей с низкой теплопроводностью) на внешней стороне стального листа образовываются зоны аномалий с пониженной температурой, которые фиксируются с помощью тепловизора (рис. 1).

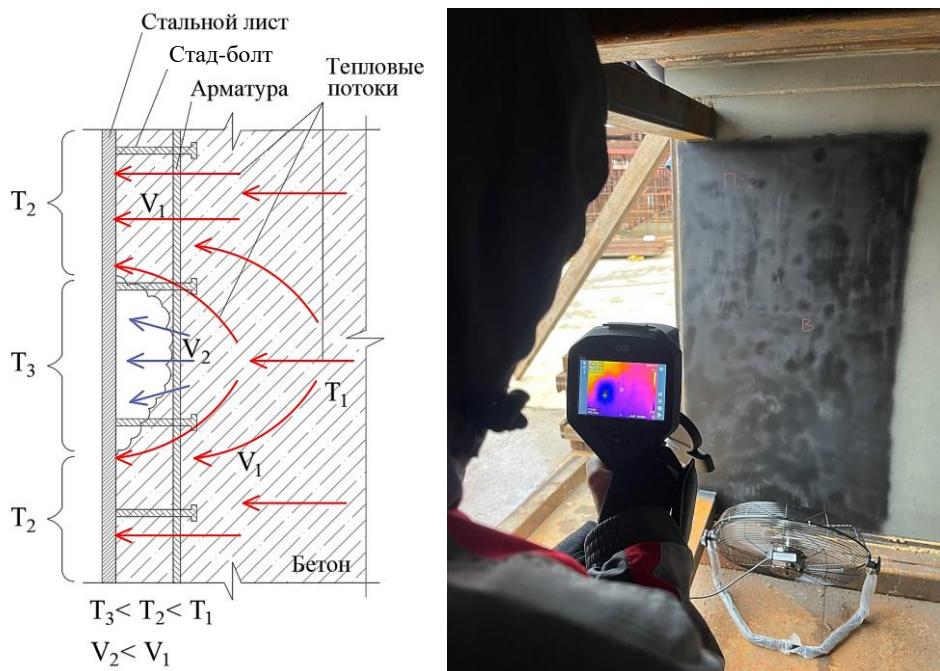


Рис. 1. Принцип работы предлагаемого метода
Fig. 1. Schematic view of the proposed method and thermal camera in operation

В случае минимальной разницы (до 10 °C) между температурой наружного воздуха и температурой внутри бетона, которая контролируется в отдельных точках посредством заранее установленных датчиков температуры (термопары или любые другие), тепло с поверхности внешнего стального листа снимается воздушным (вентиляторами) или водяным (увлажнением холодной водой) способом на пике экзотермической реакции. Датчики контроля температуры для оценки протекания экзотермической реакции закладываются внутри сечения, вплотную к стальному листу, а также на расстоянии 5 и 10 см от внутренней поверхности листа и в середине сечения. Охлаждение конструкции проводится с отслеживанием температуры по внутренним датчикам. Время охлаждения и характеристики используемых охлаждающих средств (температура и скорость ветрового потока, температура и объем охлаждающей жидкости) определяются посредством выполнения теплотехнического расчета.

Описанная методика применима и после завершения экзотермических процессов, когда температура конструкции стабилизируется и становится равной температуре окружающей среды. В этом случае конструкцию предварительно нагревают, контролируя внутреннюю температуру до достижения прогрева на глубину 15–20 см (поскольку на большей глубине образование дефектов маловероятно). Необходимая мощность и продолжительность нагрева определяются теплотехническим расчетом и уточняются на первом контрольном участке, оснащенном датчиками температуры.

Установка датчиков на всех конструкциях объекта не обязательна; достаточно оборудовать несколько участков с разнотипными конструкциями, разли-

чающимися, например, параметрами сечения, характеристиками стального листа, классом бетона и т. д. Равномерность прогрева обеспечивается комбинацией тепловых пушек и организацией замкнутых тепловых контуров.

Помимо контроля внутренних дефектов, настоящей методикой возможен контроль наличия и расположения внутренних стальных элементов, плотно примыкающих (приваренных) изнутри к стальному листу и также скрытых от осмотра (стад-болты, ребра внутри сечения листа). Эффект визуализации этих элементов на экране тепловизора достигается различной скоростью и объемом проходящего тепла через стальные элементы и бетон от центра сечения к краю к стальному листу.

Данная методика была апробирована на двух реальных разнотипных конструкциях – трубобетонные колонны большой высоты (пример 1) и армоопалубочные блоки системы внешнего листового армирования (пример 2). В эти конструкции искусственно закладывались разные типы дефектов для оценки возможностей рассматриваемой методики. Исследуемые элементы были тестовыми и не использовались в качестве несущих конструкций зданий и сооружений.

Пример 1. Трубобетонная колонна. Исходные данные: высота колонн – 22 м; положение в пространстве – наклонные; бетон – В80; сечение трубы – 920 мм; толщина стенки – 8 мм; температура наружного воздуха – -7°C (январь); расстояние дефектов от верха трубы – 35 см (дефект № 1 – воздушная полость), 85 см (дефект № 2 – фрагмент пеноплекса).

Дефекты расположены между стенкой трубы и арматурным каркасом вплотную к трубе (рис. 2). Тепловизионное исследование проводилось на третий день после заливки.

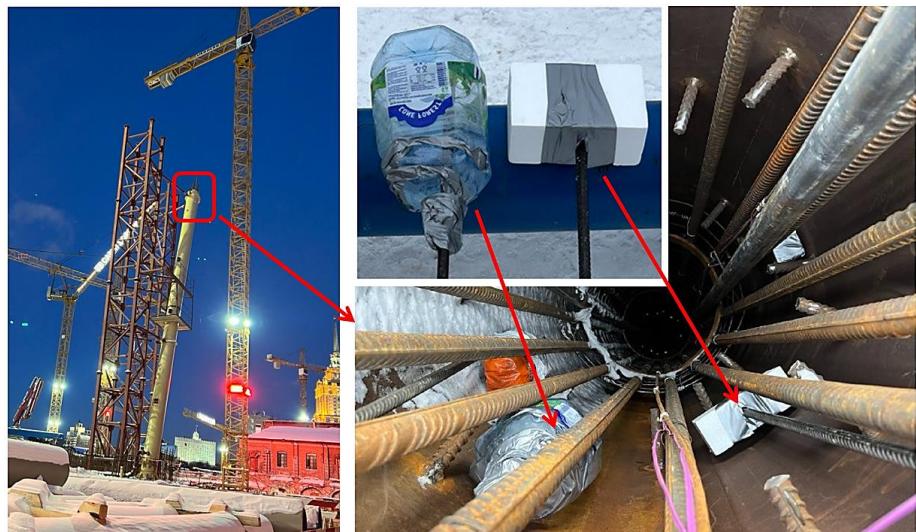


Рис. 2. Монтаж дефектов в верхней части трубобетонной колонны
Fig. 2. Flaw detection in the upper part of a shotcrete column

Пример 2. Армоопалубочный блок П-образного фрагмента стен с системой внешнего листового армирования. Исходные данные: высота стены – 1,8 м;

толщина стены – 40 см; бетон – В40; толщина стенки – 10 мм; температура наружного воздуха – +20 ° (август), +7 °С (октябрь). Расположение и типы дефектов показаны ниже (рис. 3, 4). Термовизионное исследование проводилось на 2, 3 и 60-й день после заливки.



Рис. 3. Монтаж дефектов внутрь стены с внешним листовым армированием
Fig. 3. Flaw detection in the wall with the outer steel shell

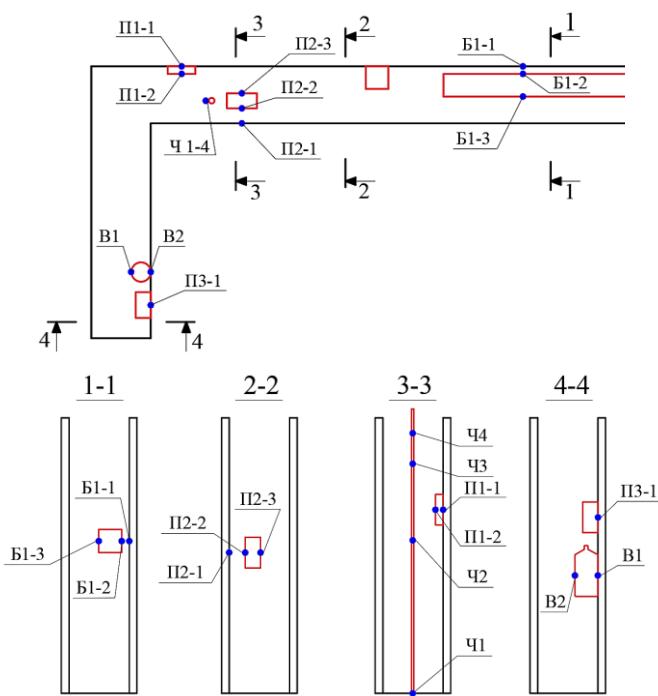


Рис. 4. Схема расположения установленных искусственных дефектов и датчиков контроля температуры
Fig. 4. Schematic of detected artificial defects and arrangement of temperature sensors

Результаты и обсуждение

Пример 1. Работа по исследованию работоспособности методики в трубобетонной колонне началась непосредственно перед заливкой данной конструкции, поэтому дефекты удалось заложить только в верхнюю часть колонны на расстоянии от верха не более метра (без установки внутрь контрольных датчиков температуры), а прогрев данной части колонны (работа проводилась зимой) практически не осуществлялся. Температура бетона вместо ожидаемой 50–60 °C оказалась менее 20 °C, а также, учитывая, что исследование проводилось с подъемника, выполнить работы по контролю в теплом контуре с возможностью дополнительного принудительного отвода тепла или нагрева не удалось.

Несмотря на такие неблагоприятные исходные условия (при отрицательной температуре наружного воздуха и минимальной положительной температуре внутри бетона трубы процесс теплопереноса от бетона к металлу осуществлялся по скорости, близкой к охлаждению вдоль металла листа), все дефекты удалось зафиксировать. На рис. 5 аномальные зоны металла трубы на экране тепловизора видны в синем цвете. При анализе термограммы по дефекту № 1 видны также аномально холодные фрагменты стальных ребер, выступающих на 20 см за поверхность трубы. Их наличие не помешало установить расположение дефекта, что свидетельствует о гибкости метода и возможности его применения на конструкциях, имеющих на внешней поверхности листа дополнительные стальные элементы – фрагменты болтов, ребра жесткости, фасонки и т. д. Положительные результаты эксперимента показали работоспособность методики, и это дало возможность уже полноценного участия в эксперименте с армоопалубочным блоком системы внешнего листового армирования, рассмотренного ниже.



Рис. 5. Результаты тепловизионного исследования трубобетонной колонны
Fig. 5. Examination of shotcrete column using the thermal camera

Пример 2. Работа на фрагменте стены проводилась в несколько этапов.

1. Монтаж искусственных дефектов и термопар для возможности непрерывного контроля температуры во время испытания. Использовались три типа дефектов: фрагменты пеноплекса 20×20 см толщиной 5 и 10 см, воздушная полость 5 л, деревянные бруски сечением 15×15 см. Часть дефектов устанавливалась вплотную к металлическому листу, часть притапливалась на глубину до 10 см. В зоне дефектов датчики устанавливались внутри вплотную к стальному листу, между стальным листом и дефектом вплотную к дефекту, если он располагался на отдалении от листа (такие сценарии также рассматривались) и в середине сечения стены. Этими датчиками контролировалось изменение температуры в зоне дефекта. Дополнительно в контрольной точке устанавливались 4 датчика по высоте стены.

2. Тепловизионное исследование проводилось в первые дни после бетонирования в период максимального экзотермического тепловыделения. Из-за малой толщины конструкции, использования бетона низкого класса и температуры окружающей среды около $+20$ °C температурный перепад между стальным листом и воздухом не превышал 10 °C. Кроме того, из-за небольших размеров искусственных дефектов тепло быстро распределялось по листу. Вследствие этого в пассивном режиме (без принудительного охлаждения или нагрева) дефекты идентифицировались нечетко и только те, что расположены вплотную к листу.

После принудительного охлаждения листа водой температурой $+15$ °C в течение короткого промежутка времени (расчетное время охлаждения составило около 10 мин) удалось выявить все приповерхностные дефекты. Они проявлялись в течение нескольких минут после начала охлаждения, т. к. тепло от более нагретого бетона начинало активно передаваться охлажденному листу. В зонах дефектов этот процесс происходит значительно медленнее из-за наличия воздушной полости, что и фиксируется тепловизором.

На рис. 6 представлены температурные кривые, зарегистрированные датчиками в конструкции. Видно, что экзотермический нагрев бетона начался через 7 ч после укладки, а пиковая температура в средней части сечения была достигнута через 24 ч. На графиках также отражен процесс принудительного охлаждения, проведенного на вторые сутки (правая часть графика, 43 ч). Это позволило оценить эффективность методики вне пика экзотермической реакции.

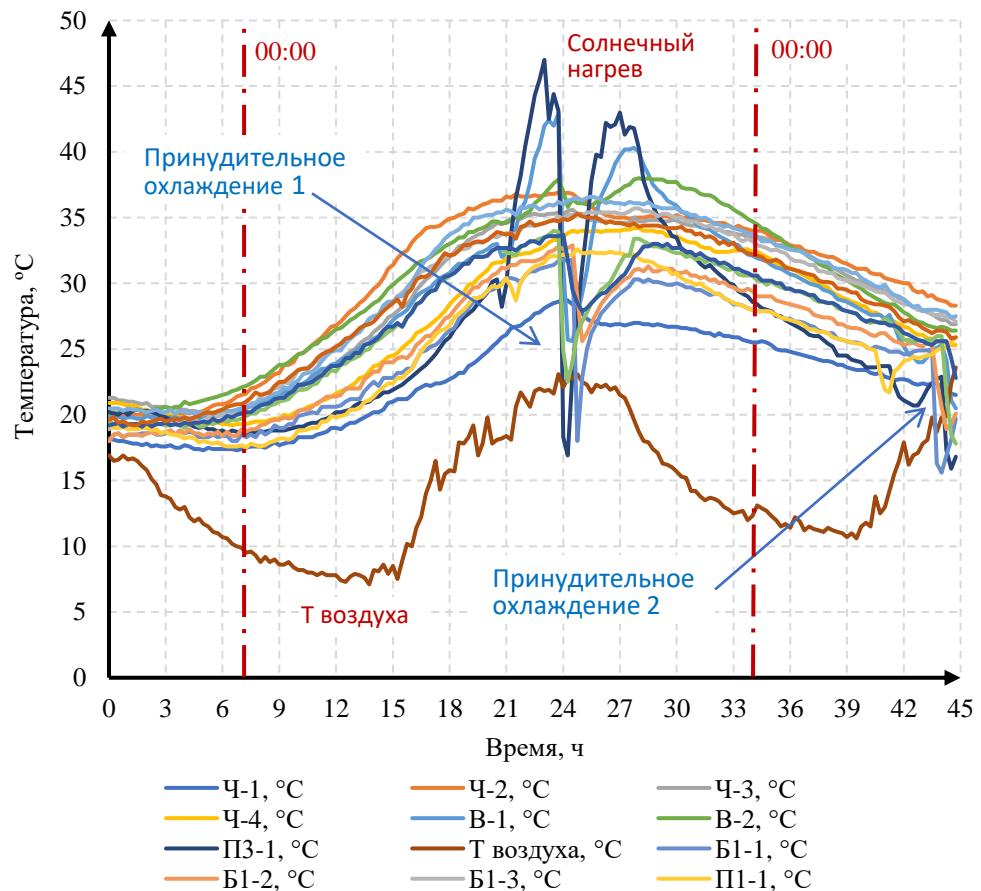
Интересный наблюдаемый эффект – влияние солнечного нагрева: участок листа в зоне датчика ПЗ-1 нагрелся до 46 °C, тогда как температура бетона за ним изменилась незначительно. Однако даже в этих условиях водяное охлаждение обеспечило быстрое остывание листа, и методика осталась работоспособной.

Дефекты, расположенные на удалении от поверхности, в данном эксперименте не идентифицировались. Следует отметить, что вероятность их образования невелика, т. к. основные дефекты формируются в зонах интенсивного армирования, где бетонная смесь уплотняется недостаточно эффективно. Для выявления подобных глубоких дефектов может потребоваться охлаждение большей продолжительности. При этом происходят следующие тепловые процессы:

- быстрое охлаждение стального листа на всю толщину;

– медленное охлаждение бетона от листа к центру, причем между листом и дефектом лист остывает быстрее, чем по неповрежденному сечению, поскольку отсутствует (снижена) подпитка теплом от центра сечения;

– охлаждение осуществляется до тех пор, пока температура непосредственно перед дефектом не начнет опускаться, чем больше производится охлаждение, тем более ярко проявляются дефекты на экране тепловизора.



Вестник ТГАСУ. 2025. Т. 27. №6

Рис. 6. Результаты температурного контроля в сечении конструкции сразу после заливки бетона
Fig. 6. Temperature control results in the structure cross-section after concreting

В рамках проводимого эксперимента после охлаждения около 30 мин удалось зафиксировать дефект (деревянный брускок Б1) на глубине 5 см в явном виде (отчетливо виден на экране тепловизора оператором), и дефект (фрагмент пенопласта П2) на глубине 10 см был виден не так явно (можно обнаружить уже в процессе постобработки тепловых снимков, но на экране тепловизора он идентифицируется менее четко). Действие методики усиливается при следующих факторах: повышение температуры внутри сечения, снижение температуры используемых охлаждающих средств, увеличение размеров дефекта – все эти три фактора вполне осуществимы на строительной площадке, поскольку в рамках

проведенного эксперимента рассматривались наименее благоприятные сценарии. На рис. 7, 8 показаны результаты обнаружения фрагмента пенопласта П3, установленного вплотную к листу, воздушной полости В1, касающейся листа частично, и горизонтально расположенного деревянного бруска Б1, расположенного на расстоянии 5 см от листа. Все показанные на рис. 4 другие дефекты также были успешно обнаружены.



Рис. 7. Фиксация дефектов П3 и В1
Fig. 7. Flow detection of P3 and V1

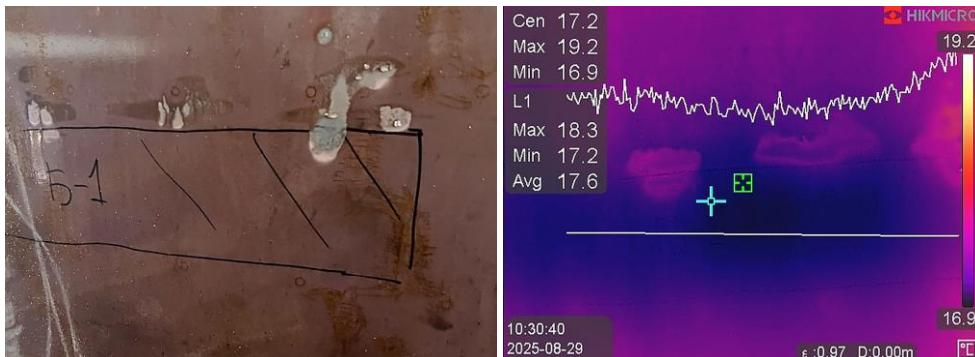


Рис. 8. Фиксация дефекта Б1, расположенного на расстоянии от листа 5 см
Fig. 8. Flow detection of B1 at 5 cm distance from the steel shell

Помимо обнаруженных дефектов, на рис. 7 четко видны все стад-болты, а также прерывистые сварные швы фасонного уголка (то есть возможность оценить тип применимых сварных швов – непрерывный, прерывистый, точечный), являющиеся элементами внутренней фермы конструкции. Это расширяет применение предлагаемой методики для контроля внутренней структуры стальных элементов сечения, расположенных вплотную к листу.

В рамках данного эксперимента также проводилось тепловизионное исследование рассматриваемого фрагмента конструкции через 60 сут после заливки. Весь процесс испытания был полностью идентичен описанному выше за исключением начального нагрева конструкции для искусственного воссоздания процесса экзотермии внутри бетонного сечения. Также, учитывая более низкую температуру наружного воздуха, принудительное охлаждение при обнаружении дефектов, расположенных вплотную к листу, удалось выполнить воздушным способом (обычным вентилятором). Нагрев осуществлялся тепловыми пушками внутри теплового контура в течение 12 ч. Графики распределения температур по сечению показаны на рис. 9.

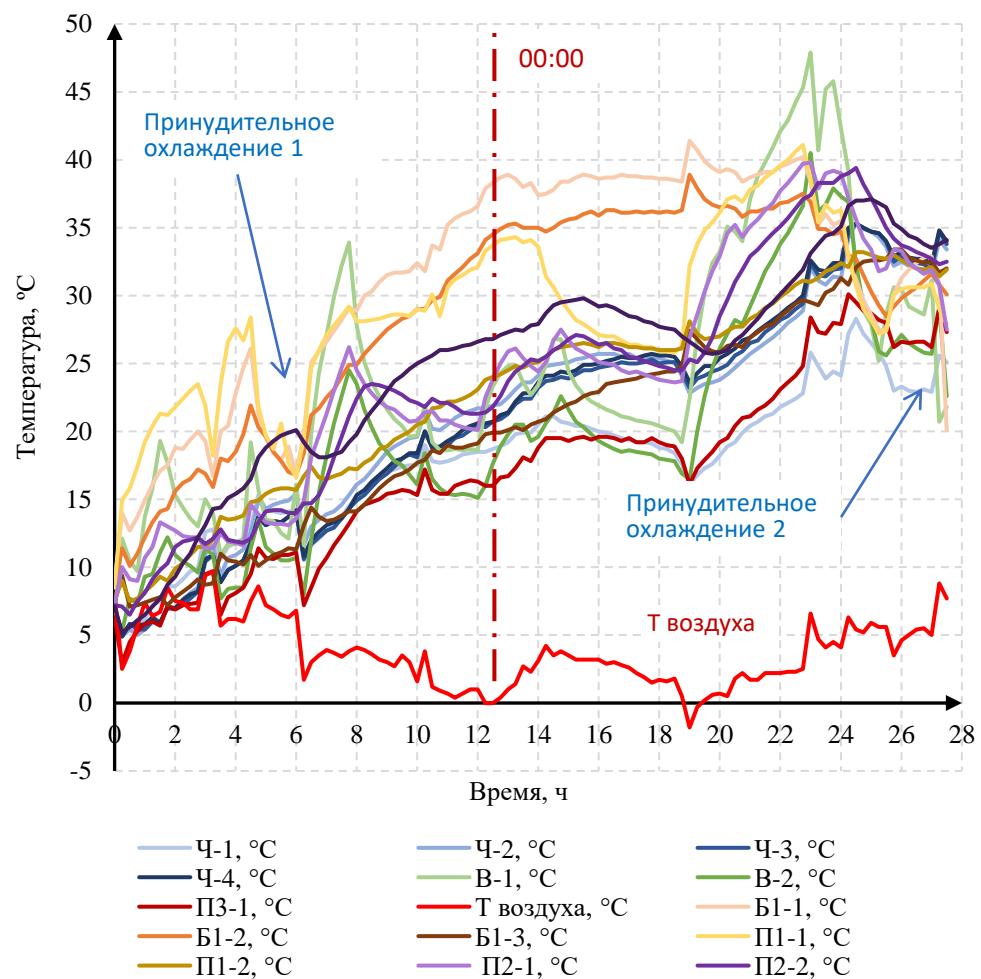


Рис. 9. Результаты температурного контроля в сечении конструкции в возрасте бетона 60 сут
Fig. 9. Temperature control results in the structure cross-section after 60-day concreting

По итогам испытаний был достигнут положительный результат, так же как и в первом эксперименте (в процессе твердения бетона), все дефекты были

обнаружены. Дополнительно во время этого испытания была проведена оценка работоспособности методики на окрашенном стальном листе, процесс тепловизионной съемки показан на рис. 1 (на экране тепловизора дефект П3).

Заключение

По итогам проведенной работы по апробации предложенной методики тепловизионного контроля качества бетонирования конструкций, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом, были получены положительные результаты на двух различных типах конструкции – трубобетонной колонне и фрагменте стены с внешней листовой арматурой. Была выполнена основная задача – при активном способе контроля (принудительное охлаждение снаружи стального листа) добиться эффекта, при котором наружный стальной лист становится прозрачным на тепловой картине и проявляются все дефекты бетонирования, это наглядно видно на рис. 7. Помимо зафиксированных дефектов, видны все шпильки (болты) как более горячие элементы: по ним тепло, как по трубкам радиатора, из центра сечения максимально быстро попадает к краю, а также стальной уголок внутренней рамы в виде вертикальной горячей полосы справа от дефекта В1.

Проведенные эксперименты позволили более глубоко понять физику тепловых процессов, происходящих в сталежелезобетонном сечении, подготовить основу для продолжения экспериментальных исследований в части разработки уже детальных критериев идентификации полученных термограмм, а также проведения термодинамических расчетов при пассивном и активном методе контроля.

Предложенная методика показала работоспособность как во время твердения бетона сразу после заливки, когда внутри сечения происходят экзотермические процессы, так и в любое время жизненного цикла конструкции (подтверждающие экспериментальные исследования были выполнены через 60 сут после заливки) и может быть рекомендована к промышленному применению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N.* Analysis and Design of Modular Composite Walls for Combined Thermal and Mechanical Loading // 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20) Espoo, Finland, August 9–14, 2009. URL: <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/37990dba-7beb-428a-b543-ce0369de35d8/content> (дата обращения: 20.09.2025).
2. *Ozaki M., Akita S., Oosuga H., Nakayama T., Adachi N.* Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Cyclic In-Plane Shear // Nuclear Engineering and Design. 2004. V. 228. P. 225–244.
3. *Takeuchi M., Narikawa M., Matsuo I., Hara K., Usami S.* Study on a concrete fillet structure for nuclear power plants // Nuclear Engineering and Design. 1998. V. 179. P. 209–223.
4. *Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z.* Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments // Nuclear Engineering and Design. Special Issue on SMiRT-21 Conference. 2014. V. 269. P. 240–249.
5. *Zhang K., Varma A.H., Malushte S., Gallocher S.* Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 269. P. 231–239.

6. *Shafaei S., Varma A.H., Seo J., Huber D., Klemencic R.* Wind Design of Composite Plate Shear Walls/Concrete Filled (SpeedCore) Systems // Engineering journal. 2022. V. 59. P. 183–208.
7. *Mithaiwala M.E., Patil A.A., Khadake N.V.* A Review on Effect of Different Set of Stiffness Modifiers Varying Through Height of Structure on Analysis of Multi-Story R.C.C. Structure // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2020. V. 7. P. 845–849.
8. *Шминдрук Е.В.* Уникальные технологии строительства высотных зданий и сооружений // Перспективные этапы развития научных исследований: теория и практика : сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 15 июля 2019 г. Кемерово : ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2019. С. 13–15.
9. *Микрюкова Е.М., Николаев И.А.* К вопросу о развитии строительства высотных зданий в России // Строительство и застройка: жизненный цикл – 2020 : материалы V Международной (XI Всероссийской) конференции, Чебоксары, 25–26 ноября 2020 г. Чебоксары : Издательский дом «Среда», 2020. С. 40–46.
10. *Ahlfeldt G.M., Barr J.* The economics of skyscrapers: A synthesis // Journal of Urban Economics. 2022. V. 129. DOI: 10.1016/j.jue.2021.103419
11. *Коробов Л.А., Назарьев О.К., Карелин Е.П., Хайдуков Г.К.* Железобетонные защитные оболочки АЭС. Москва : Атомиздат, 1978. 125 с.
12. *Воронков Р.В.* Железобетонные конструкции с листовой арматурой. Москва : Стройиздат, 1975. 144 с.
13. *Белов В.В.* Железобетонные резервуары давления с внешним листовым армированием. Нелинейное деформирование при силовых и температурных воздействиях : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белов Вячеслав Вячеславович. Ленинград, 1988. 206 с.
14. *Wendrich A., Trela C., Krause M., Maierhofer C., Effner U., Wöstmann J.* Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Traveltime Tomography // ECNDT. 2006. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.2.5.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
15. *Мочко А., Мочко М., Андреев В.И.* Проверка качества бетона в существующих конструкциях. Технологии европейских стандартов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 967–975. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.967-975
16. *Коротких Д.Н., Дорф В.А., Капустин Д.Е., Зейд Килани Л.З.* Контроль качества укладки монолитного бетона в конструкции с несъемной стальфибробетонной опалубкой // Строительные материалы. 2024. № 11. С. 31–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-31-39
17. *Коротких Д.Н., Капустин Д.Е.* Прогнозирование прочности и контроль качества укладки монолитного бетона в конструкциях с несъемной опалубкой // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 55–69. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.55-69
18. *Сагайдак А.И.* Стандарт на метод акустико-эмиссионного контроля бетонных и железобетонных изделий и монолитных конструкций // Бетон и железобетон. 2021. № 3 (605). С. 19–24.
19. *Пивоваров В.А.* Метрологическое обеспечение дефектоскопии бетона // Альманах современной метрологии. 2022. № 4 (32). С. 59–67.
20. *Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Калмакова П.С.* Система контроля сплошности бетона сталежелезобетонных конструкций на основе тепловизионного метода // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 2. С. 150–156. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-150-156

REFERENCES

1. *Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N.* Analysis and Design of Modular Composite Walls for Combined Thermal and Mechanical Loadings. *Transactions of the Internal Association for Structural Mechanics in Reactor Technology Conference, SMiRT-20*, Div. TS 6 Paper 1820, Espoo, Finland, IASMiRT, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2009.
2. *Ozaki M., Akita S., Oosuga H., Nakayama T., Adachi N.* Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Cyclic In-Plane Shear. *Nuclear Engineering and Design*. 2004; 228: 225–244. Available: www.sci-hub.ru/10.1016/j.nucengdes.2003.06.010 (accessed July 25, 2024).

3. Takeuchi M., et al. Study on a Concrete Fillet Structure for Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering and Design*. 1998; 179: 209–223. Available: [www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493\(97\)00282-3](http://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493(97)00282-3) (accessed July 25, 2024).
4. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments. *Nuclear Engineering and Design. Special Issue on SMiRT-21 Conference*. 2014; 269: 240–249. Available: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029549313005220?via%3Dihub (accessed July 25, 2024).
5. Zhang K., Varma A.H., Seo J., Huber D., Klemencic R. Effect of Shear Connectors on Local Buckling and Composite Action in steel Concrete Composite Walls. *Nuclear Engineering and Design*. 2014; 269: 231–239.
6. Shafaei S., Varma A.H., Seo J., Huber D., Klemencic R. Wind Design of Composite Plate Shear Walls/Concrete Filled (SpeedCore) Systems. *Engineering Journal*. 2022; 183–208: 2021–11.
7. Mithaiwala M.E., Patil A.A., Khadake N.V. A Review on Effect of Different Set of Stiffness Modifiers Varying through Height of Structure on Analysis of Multi-Story R.C.C. Structure. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020; 7: 845–849.
8. Shmindruk E.V. Unique Technologies for High-Rise Building Construction. In: *Proc. 3rd Int. Sci. Conf. 'Advanced Stages of Research Development: Theory and Practice'*. 15 July 2019. Kemerovo, 2019. Pp. 13–15. (In Russian)
9. Mikryukova E.M., Nikolaev I.A. Development of High-Rise Construction in Russia. In: *Proc. 5th Int. Sci. Conf. 'Construction and Housing: Life Cycle'*. 25–26 November 2020. Cheboksary: "SredA", 2020. Pp. 40–46. (In Russian)
10. Ahlfeldt G.M., Barr J. The Economics of Skyscrapers: A Synthesis. *Journal of Urban Economics*. 2022; 129. DOI: 10.1016/j.jue.2021.103419
11. Korobov L.A., Nazar'ev O.K., Karel'kin E.P., Khaidukov G.K. Reinforced Concrete Protective Shells for Nuclear Power Plants. Moscow: Atomizdat, 1978. (In Russian)
12. Voronkov R.V. Reinforced Concrete Structures with Steel Shells. Moscow: Stroizdat, 1975. 144 p. (In Russian)
13. Belov V.V. "Reinforced concrete pressure vessels with external sheet reinforcement. Nonlinear deformation under force and temperature effects". PhD Thesis. Leningrad, 1988. – 206 p. (In Russian)
14. Wendrich A., Trela C., Krause M., Maierhofer C., Effner U., Wöstmann J. Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Travel-Time Tomography. *ECNDT*. 2006; 3.2.5: 11.
15. Mochko A., Mochko M., Andreev V.I. Checking the Concrete Quality in Structures. European Standard Technologies. *Vestnik MGSU*. 2019; 14 (8): 967–975. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.967-975. (In Russian)
16. Korotkikh D.N., Dorf V.A., Kapustin D.E., Zeid Kilani L.Z. Quality Control of Monolithic Concrete Placement in Structures with Permanent Steel Fiber-Reinforced Concrete Formwork. *Stroitel'nye materialy*. 2024; (11): 31–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-31-39 (In Russian)
17. Korotkikh D.N., Kapustin D.E. Strength Predicting and Quality Control of Cast-in-Situ Concrete Placement in Structures with Permanent Formwork. *Zhelezobetonnye konstruktsii*. 2024; 8 (4): 55–69. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.55-69 (In Russian)
18. Sagaidak A.I. Standard for Acoustic Emission Testing of Concrete and Reinforced Concrete Products and Cast-in-Situ Structures. *Beton i zhelezobeton*. 2021; 3 (605): 19–24. (In Russian)
19. Pivovarov V.A. Metrological Support for Concrete Flaw Detection. *Al'manakh sovremennoi metrologii*. 2022; 4 (32): 59–67. (In Russian)
20. Arleninov P.D., Krylov S.B., Kalmakova P.S. Thermal Imaging of Concrete Continuity in Steel Structures. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2024; (2): 150–156. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-150-156 (In Russian)

Сведения об авторе

Арленинов Пётр Дмитриевич, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией, Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона

и железобетона НИЦ «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, корп. 5; доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университета, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, niizhb_lab8@mail.ru

Author Details

Petr D. Arleninov, PhD, Research, Development, Design and Engineering Institute of Concrete and Reinforced Concrete, 6, 2-ya Institutskaya Str., 109428, Moscow, Russia; The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, niizhb_lab8@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2025
Одобрена после рецензирования 27.11.2025
Принята к публикации 28.11.2025

Submitted for publication 19.11.2025
Approved after review 27.11.2025
Accepted for publication 28.11.2025

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. № 6. 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 (6): 157–171.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 628.14:628.19+614.77

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-157-171

EDN: VAOVSL

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, СОЦИАЛЬНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДЫ ПО ИЗНОШЕННЫМ СЕТЯМ НА ПРИМЕРЕ КРУПНОГО СИБИРСКОГО ГОРОДА

Ольга Дмитриевна Лукашевич, Елена Юрьевна Осипова

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

Аннотация. Актуальность исследования связана с необходимостью систематизации данных об авариях, утечках и вторичном загрязнении питьевой воды в водопроводных системах из разных типов труб.

Цель работы: оценка состояния изношенности систем питьевого водоснабжения в регионах Центральной России и в Сибири, анализ возможного влияния материала водопроводных систем при длительной эксплуатации на качество воды и здоровье населения, а также обоснование комплекса организационно-хозяйственных мероприятий по совершенствованию водохозяйственной деятельности (ВХД).

Задачи исследования: проанализировать современное состояние магистральных и распределительных водопроводных систем российских городов; дать оценку возможности применения отечественного и зарубежного традиционного опыта и инноваций для повышения надежности, долговечности и экологичности водопроводов путем выбора оптимальных материалов труб; обосновать и предложить мероприятия, способствующие устранению основных причин утечек и аварийности, а также снижения качества хозяйственно-питьевой воды на этапе доставки потребителю.

Методы. Использованы общенаучные методы исследования: описательно-аналитический, обобщение данных научно-технической литературы; междисциплинарный синтез, логические обобщения и визуализация данных.

Результаты. Проанализированы результаты зарубежных и отечественных исследований состояния водонесущих сетей из металлических и пластиковых труб. Выявлены особенности вторичного загрязнения транспортируемой воды в зависимости от исходного состава, свойств воды и технических параметров трубопроводов.

Предложены мероприятия для повышения эффективности эксплуатации и содержания изношенных водопроводных систем.

Ключевые слова: качество хозяйственно-питьевой воды, централизованные системы подачи и распределения воды, водопровод, износ коммунальной инфраструктуры, вторичное загрязнение воды, внутренние отложения в водопроводных трубах

Для цитирования: Лукашевич О.Д., Осипова Е.Ю. Экономические, социальные и экологические аспекты проблемы транспортировки воды по изношенным сетям на примере крупного сибирского города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 157–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-157-171. EDN: VAOVSL

ORIGINAL ARTICLE

ECONOMIC, SOCIAL AND ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER TRANSPORTATION THROUGH WORN-OUT NET-WORKS IN A LARGE SIBERIAN CITY

Olga D. Lukashevich, Elena Yu. Osipova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The relevance of the study is associated with the need to systematize the data on accidents, leaks and secondary pollution of drinking water in water pipes.

Purpose: The purpose of the work is to assess deterioration of drinking water supply systems in Russian regions and in Tomsk, identify the possible impact of the material of water pipes on the water quality and public health during long-term operation, and justify a set of organizational and economic measures to improve the water supply.

Methodology: Descriptive and analytical methods, data generalization from the literature, interdisciplinary synthesis, logical generalization, data visualization.

Research findings: The current state of the central and distribution water supply systems in Russian cities is evaluated. The possibility of using Russian and foreign traditional experience and innovations is evaluated to increase the reliability, durability, eco-friendliness of water pipes by selecting the best pipe materials. Measures are proposed to eliminate the main causes of leaks, accidents in water supply systems and the quality improvement of drinking water at the stage of delivery to the consumer.

Value: The Russian and foreign experience in water pipes made of metal and plastic is highlighted. Secondary pollution of supplied water is evaluated, depending on the initial composition and properties and process parameters of pipelines. Measures are proposed to improve the efficiency of dilapidated water pipes.

Keywords: drinking water quality; centralized water supply and distribution system; communal infrastructure ageing; secondary water pollution; scale buildup in water pipes

For citation: Lukashevich O.D., Osipova E.Yu. Economic, Social and Ecological Aspects of Water Transportation through Worn-Out Networks in a Large Siberian

City. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 157–171. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-157-171. EDN: VAOVSL

Введение

Питьевая вода – фундаментальный элемент жизнеобеспечения населения; ее качество во многом определяется не только экологической чистотой водоподготовки, но и надежностью доставки и распределения потребителям. Сегодня задача обеспечения населения доброкачественной водой полностью решена только в нескольких регионах, столичных городах и на редких территориях, где сохранились незагрязненные природные водные объекты. Усредненные цифры, по данным Росстата для разных регионов России за последние 10 лет, показывают, что около 15 % питьевой воды не соответствует санитарно-гигиеническим нормативам по химическим показателям качества, почти 5 % – по биологическим.

Передача в частные руки организаций, занимающихся водохозяйственной деятельностью (ВХД), недостаточное финансирование, экономическая безграмотность, а также нежелание властных и бизнес-структур инвестировать в системы водоснабжения и водоотведения привели за последние 30 лет к состоянию крайней степени изношенности водопроводных сетей [1–5]. Данная проблема носит комплексный характер, характеризующийся экономическим, социальным, экологическим аспектами, и имеет общегосударственное значение. Обеспокоенность ученых, занимающихся проблемами улучшения водоснабжения [6, 7], медиков, изучающих последствия воздействия повышенного содержания в воде загрязнителей на организм человека [8–10], а также представителей органов надзора в сфере безопасности и санитарно-эпидемиологического благополучия населения [11] отражается как в научных публикациях, так и в социальных сетях. Однако подобная информация часто носит разрозненный, частный характер, бывает слабо структурирована либо после статистической обработки настолько обобщена, что не позволяет выявить региональные и сезонные особенности учитываемых показателей.

В настоящей статье обобщены сведения о современном состоянии проблемы изменения качества питьевой воды при ее транспортировке к потребителю; приведены данные о техническом состоянии водопроводных сетей г. Томска: материалы, диаметры труб, их протяженность, степень износа; проанализированы основные тенденции развития технических средств совершенствования водопроводных систем, служащих для подачи и распределения питьевой воды в контексте сохранения ее экологической безопасности и с учетом экономической целесообразности материалов труб, предлагаемых на рынке ВХД.

Цель работы – оценить состояние и риски аварий систем питьевого водоснабжения в центральной части России и Сибири, выявить возможности влияния материала водопроводных систем при длительной эксплуатации на качество воды и здоровье населения и обосновать комплекс организационно-хозяйственных мероприятий по совершенствованию ВХД, реноваций на водонесущих сетях и надзора за питьевым водоснабжением.

Материалы и методы исследования. Проведены анализ и обобщение доступной российской и зарубежной научной литературы и электронных ресурсов по

научно-техническому уровню изучения системы «вода – материал тубы – водопроводные отложения». Использованы общенаучные методы исследования, теоретические и прикладные материалы литературных источников, актуальных нормативных документов (СП 31.13330.2012, СП 517.1325800.2022, СанПиН 2.1.4.1074–01, СанПиН 2.1.3684–21).

Основные результаты

Группа авторов Центра стратегических разработок (ЦСР) выполнила исследование ключевых трендов развития отечественного водоснабжения и водоотведения, результаты которого были опубликованы в виде доклада [5]. Среди выделенных проблем функционирования отрасли ВиВ и предложенных вариантов ее реформирования (главным образом организационно-административного, маркетингового, финансового, тарифного и инвестиционного характера) следует выделить несколько аспектов, связанных с тематикой данной статьи. По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат), 46 % водопроводных сетей в городах и 41 % в сельских поселениях требуют замены из-за крайней изношенности. Однако опрос, проведенный сотрудниками ЦСР среди организаций, занимающихся системами подачи и распределения воды, показал более высокие цифры: более 56 % сетей нуждаются в обновлении, особенно в малых городах и организаций ВиВ в сельской местности (рис. 1).

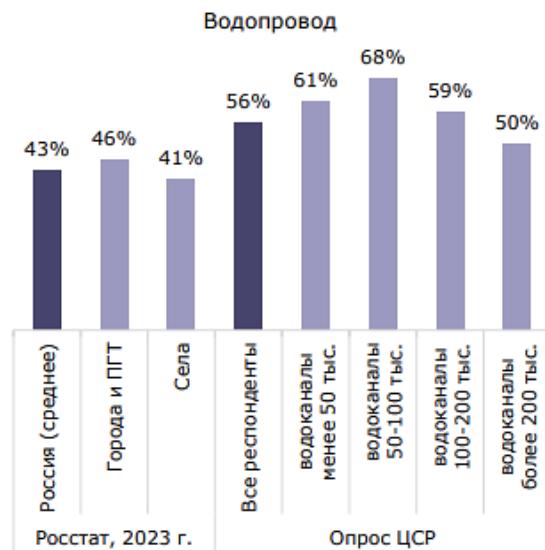


Рис. 1. Результаты оценки статистических данных по водопроводам, нуждающимся в замене в России, 2023 г. [5]

Fig. 1. Statistical data on water supply systems to be substituted in Russia in 2023. Adopted from [5]

Приведенные показатели тесно связаны с катастрофическим износом основных фондов, следствием которого являются значительные потери объемов

воды из-за утечек и аварий. Так, в 2022 г. потери составили 23 % от объема воды, поступившей в сети. Кроме того, растут затраты на содержание ветхих сетей, организации ВиВ сталкиваются с убыточностью из-за невозможности покрыть свои расходы через тарифную политику, т. к. вода – особый социально значимый ресурс, стоимость которого для населения регулируется государством.

Однако эксперты сферы ЖКХ сходятся во мнении, что доля обновляемых водопроводных систем ничтожно мала по сравнению с количеством труб, ежегодно приходящих в негодность. Такая ситуация ведет к многочисленным авариям и снижению качества воды в кранах.

В докладе [5] показаны выявленные противоречия между данными Росстата и результатами опроса ЦСР: Росстат отмечает снижение аварийности в секторе водопроводно-канализационного хозяйства почти на 70 % за последние 20 лет, а 55 % участников опроса – организаций ВиВ – сообщают о росте числа аварий в этот период. Также Росстатом выявлены значительные отличия по износу основных фондов в секторе ВиВ: в 2021 г. в среднем по России он составил около 44 %, при этом в Сибирском федеральном округе – 58 % (в Республике Тыва – более 90 %), в Дальневосточном – 31 %. Опросом ЦСР установлены более высокие показатели износа: в среднем – 68 %, а в небольших организациях ВиВ, обслуживающих 50–100 тыс. жителей, – 81 %.

В 2022 г. на водопроводных сетях произошло 34,7 тыс. аварий, что в среднем составляет 0,06 аварии на 1 км сети (по данным Росстата). Однако опрос ЦСР и информация ЕИАС ФАС России [Там же] позволили зафиксировать другую цифру: 0,48 аварии на 1 км сети (рис. 2). Подобное расхождение частично объясняется существующей неопределенностью в трактовке понятия «авария» и отсутствием законодательно закрепленных требований к заполнению соответствующих форм организациями ВиВ.

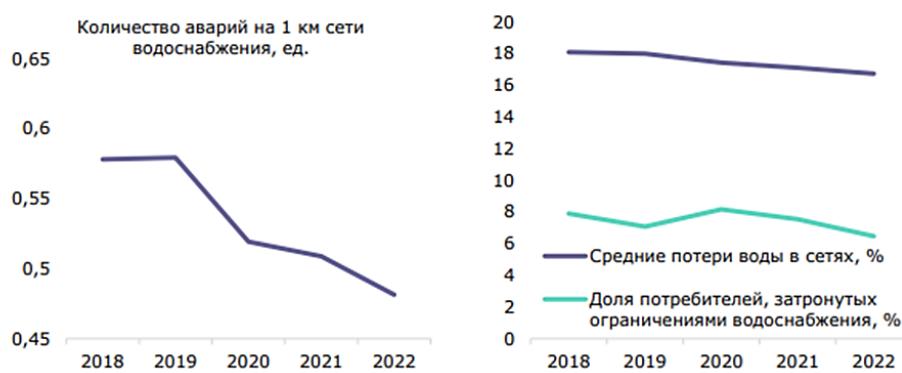


Рис. 2. Средние значения параметров аварийности работы водоснабжающих организаций (холодная вода) по результатам анализа данных ЕИАС ФАС России [5]

Fig. 2. Average values of accident parameters on cold water supply organizations based on the data from EAAS FAS Russia

Авторами [5] выделены явно «недостаточные темпы обновления сетей и основных фондов для снижения уровня их износа»: в России ежегодно заменяется лишь 0,9–1,1 % водопроводных сетей. По данным Росстата, в 2020–2023 гг.

среднегодовой темп обновления водопроводных сетей составил 1,02 % их общей протяженности. Доля изношенных сетей не уменьшается, и отсутствует положительная динамика по замене водопроводов в течение последних лет: в целом по России обновляемость сетей водоснабжения в 2020–2023 гг. составила 1,02 % от их общей длины.

Приведенные данные подтверждаются сведениями из других источников. Независимая газета (https://www.ng.ru/economics/2024-10-31/4_9127_waterservice.html) сообщает о накопленном износе сетей водоснабжения в стране на уровне 75 %, несмотря на выделение из бюджета сотен миллиардов рублей на модернизацию питьевого водоснабжения.

Подобный вывод сделан на новостном сайте <https://lenta.ru/articles/2022/07/07/jkh/> : «ежегодно приходят в негодность 3 % от общей протяженности сетей, при этом только 2 % заменяются новыми». Для достижения целевых показателей эта цифра должна увеличиваться и достигнуть к 2030 г. как минимум 5 %. Такое положение дел связано с двумя основными факторами: недофинансированием и заменой изношенных труб на новые, но не соответствующие требованиям качества. Например, используются полимерные трубы, в состав которых входят не проверенные компоненты из вторсырья, или реставрированные стальные трубы, которые ранее были использованы. По данным Ассоциации производителей трубопроводных систем, доля таких труб на рынке в 2020 г. составила 30 %. В целом по России ситуация неравномерна: больше средств на модернизацию водопроводных сетей выделяется в регионах, где состояние сетей лучше среднего и есть достаточный бюджет или выполняются государственные и региональные программы по обновлению систем ВиВ [5].

Существует прямая связь между состоянием водопроводных систем и качеством воды, контактирующей с внутренней поверхностью труб (рис. 3).



Рис. 3. Доля не соответствующих санитарно-гигиеническим нормативам проб воды из распределительной сети централизованных систем водоснабжения по годам, % [11]

Fig. 3. Percentage of water samples from the distribution network of centralized water supply systems that do not meet sanitary and hygienic standards

По данным Госдоклада Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека [11], в 2024 г. фиксируется превышение среднероссийского уровня проб питьевой воды из распределительной сети централизованных систем водоснабжения, не соответствующих гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям (11,64 %), в 44 субъектах Российской Федерации. Для Томской области этот показатель составил 42,17 %.

Представляет интерес анализ данных о качестве воды до и после контакта с материалом водопроводных труб и накопленными в них отложениями. Факторами, влияющими на состав воды в кране потребителя, являются состав и свойства воды в водоисточнике, качество воды после ее обработки на водоочистных сооружениях, а также те возможные химические и биохимические процессы, происходящие при контакте воды и содержащихся в ней микропримесей с внутренней стенкой трубы (чистой или покрытой отложениями). Согласно Госдокладу, «доля веществ 1-го класса опасности, концентрация которых не соответствует гигиеническим нормативам, увеличилась: в источниках водоснабжения с 1,07 % в 2022 г. до 1,28 % в 2024 г., перед подачей в распределительную сеть соответственно с 4,76 до 5,27 %, а в распределительной сети уменьшилась с 5,08 до 3,7 %».

При этом «доля веществ 2-го класса опасности, содержание которых превышает ПДК, также увеличилась в питьевой воде перед подачей в водопроводы с 1,67 % в 2022 г. до 2,49 % в 2024 г., в распределительной сети соответственно с 2,21 до 2,79 % и уменьшилась с 4,67 до 4,11 % в источниках водоснабжения».

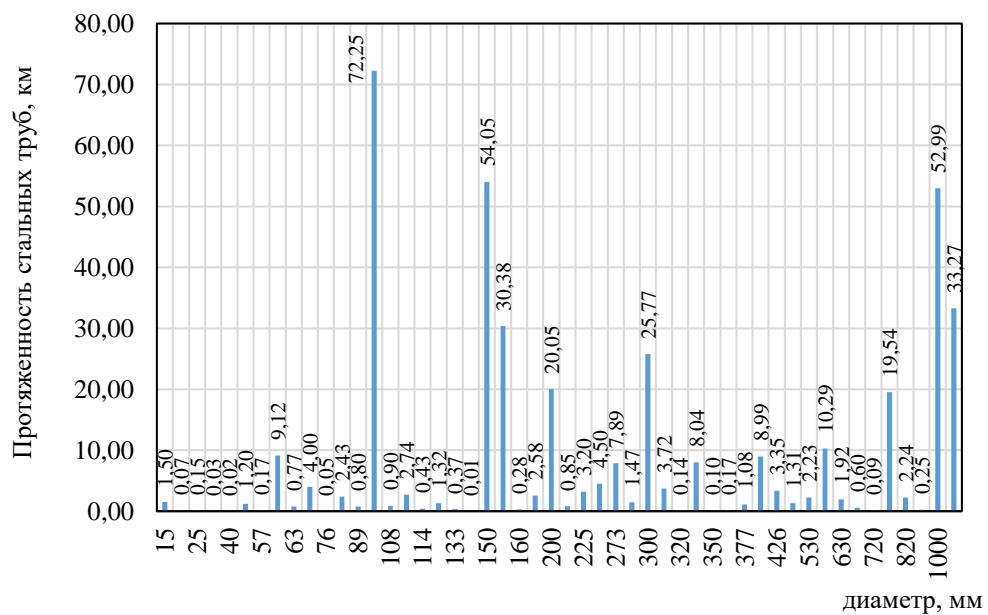
Сложившаяся ситуация с качеством воды для городской и сельской местности отличается. По общему показателю (городские и сельские поселения) целевые значения для водопроводной воды, запланированные федеральным проектом «Чистая вода» на 2024 г., выполнены только в 19 субъектах Российской Федерации. В Томской области они не достигнуты на 8,85 %. Для сравнения с другими сибирскими регионами: показатели не выполнены в Забайкальском крае (на 4,49 %), Республике Бурятия (на 3,0 %), Республике Хакасия (на 0,55 %), Кемеровской области (на 0,4 %), Омской области (на 0,16 %), Красноярском крае (на 0,1 %) [Там же]. Если рассматривать только областной центр – г. Томск, то здесь, несмотря на ветхость сетей, качество питьевой воды соответствует нормативам.

В 27 субъектах РФ значения целевого показателя «Доля городского населения, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения, %», запланированного на 2024 г., не достигнуты [Там же].

Анализ материалов ресурсоснабжающих организаций показывает, что сфера ЖКХ в целом и ВХД как ее часть находится в крайне сложном положении. Здесь наблюдаются противоречия между бизнесом и государственными интересами: объекты ВХД по концессионным договорам передаются частным инвесторам, которые обеспечивают модернизацию, но сама инфраструктура остается в собственности государства. Недопустимость снижения надежности услуг ВиВ для населения, ограничения на увеличение тарифов приводят к тому, что бизнесмены не только не получают прибыль, но и работают с убытками. В этом главная причина отсутствия интереса со стороны инвесторов к переоснащению и модернизации водопроводных сетей.

Томск с населением около 550 тыс. чел. можно рассматривать как типичный крупный сибирский город. Ресурсоснабжающая организация ООО «Томскводоканал» обслуживает почти 821 км водопроводных сетей (https://vodo-kanal.tomsk.ru/company_today.html). По этим сетям в город подается очищенная артезианская вода, полностью соответствующая требованиям СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Контроль качества воды осуществляется по химическим и микробиологическим показателям на каждом этапе: артезианская скважина → станция водоподготовки → система подачи и распределения воды → потребитель.

Материал труб, уложенных до 70-х гг. XX столетия, в основном чугун. Позднее начали использоваться трубы из разрешенных марок стали. Последние два десятилетия, как и в целом по стране, стало практиковаться строительство полиэтиленовых трубопроводов. Ситуация на 2024 г. с длиной водопроводов разного диаметра в Томске отражена на рис. 4–6.



Вестник ТГАСУ. 2025. Т. 27. №6

Рис. 4. Протяженность водопроводов из стальных труб в г. Томске (по данным ООО «Томскводоканал»)

Fig. 4. Length of steel pipe water mains in Tomsk (according to the data from ООО “Tomskvodokanal”)

По данным «Томскстата», на конец 2024 г. в Томской области насчитывалось 1643,2 км водопроводных сетей, нуждающихся в замене (43,3 % от их общей протяженности). В городской местности в замене нуждалось 56,9 % сетей (по данным 70.rosstat.gov.ru).

Протяженность сетей водоотведения, нуждающихся в замене, составила 758,4 км (53,4 % от общей протяженности). В городской местности износ сетей достигает 63,3 %, в сельской – 19,6 %. В 2025 г. ООО «Томскводоканал» пла-

нирует построить и реконструировать более 6 км сетей различного диаметра, а также отремонтировать около 5 км сетей водоснабжения и водоотведения в рамках программы капремонта.

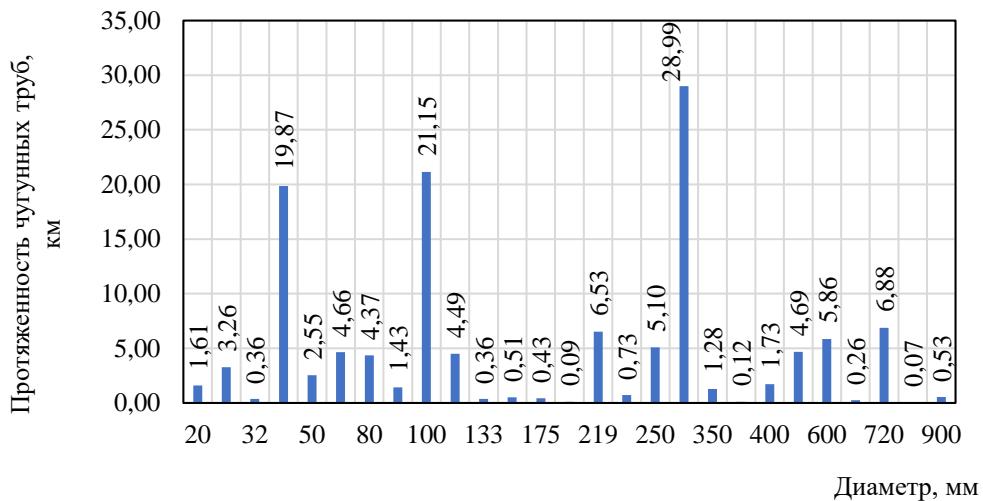


Рис. 5. Протяженность водопроводов из чугунных труб в г. Томске (по данным ООО «Томскводоканал»)

Fig. 5. Length of cast iron water pipes in Tomsk (according to data from OOO “Tomskvodokanal”)

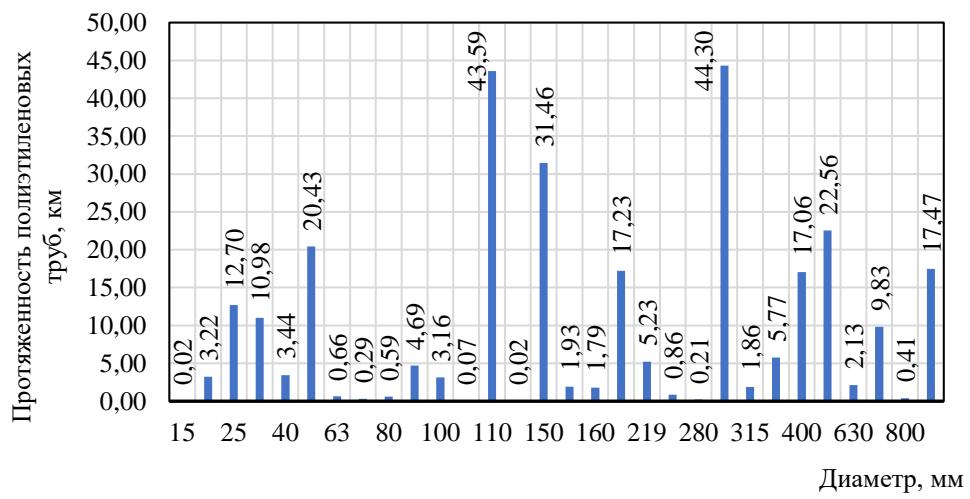


Рис. 6. Протяженность водопроводов из полиэтиленовых труб в г. Томске (по данным ООО «Томскводоканал»)

Fig. 6. Length of polyethylene water pipes in Tomsk (according to data from OOO “Tomskvodokanal”)

Как видно, при высоком уровне износа сетей, превышающем 50 %, что обуславливает значительную аварийность, запланированные темпы ремонта

остаются недопустимо низкими. Для разработки и реализации комплексной программы замены ветхих сетей необходимо учесть ряд базовых факторов.

К ним относятся: пропускная способность; решение вопроса о полной перекладке трубопровода (при 100%-м износе) или использовании бестраншейной прокладки методом «труба в трубе» с монтажом полимерных труб; выбор материала труб (чугун, сталь, полимер, композит) исходя не только из экономической целесообразности, но и с учетом рисков вторичного загрязнения воды при контакте с веществами, выделяющимися из труб и отложений на них.

Приведем краткие пояснения к перечисленным факторам. На некоторых участках сети скорость движения воды может оказаться очень низкой. В холодное время года здесь возникает угроза замораживания. Проложенные ранее трубопроводы большего диаметра, на перспективу развития, часто остаются невостребованными из-за снижения потребления воды. Это приводит к застоем воды в системе, которые способствуют окислительным процессам. Несогласованность по диаметрам трубопроводов усложняет рациональное зонирование сетей, затрудняя достижения стабилизации давления в кранах у потребителей. В результате система подачи и распределения воды становится трудноуправляемой из-за сложности, ненадежности и неустойчивости. Избыток давления провоцирует существенные утечки воды, аварии в местах с повышенным износом инфраструктуры ЖКХ.

Загрязнение водопроводных сетей осадками химического происхождения и биологическими обрастаниями приводит к ухудшению санитарно-гигиенических показателей транспортируемой воды [8, 12, 13] (рис. 7). Так, авторами работы [12] показан рост канцерогенного риска при контакте воды, очищенной до питьевого качества на инфильтрационном водозаборе, с городскими сетями.



Рис. 7. Загрязнение водопроводных сетей (Кармалов А.И. Повышение эффективности эксплуатации водозаборных скважин на основе методов химической регенерации и применения полимерных фильтров: автореферат диссертации)

Fig. 7. Contamination of water pipes (photos provided by Karmalov A.I. Dissertation Abstract ‘Efficiency improvement of water intake wells based on chemical regeneration methods and the use of polymer filters’)

возможно попадание последних в транспортируемую воду при использовании труб из полиэтилена. Полиэтилен под воздействием нефтепродуктов, фенолов, ароматических углеводородов набухает и становится пористым. Лучшие результаты были получены для высокопрочного чугуна, который оказался хорошим барьером для всех испытанных исследователями органических поллютантов.

Степень подверженности труб и трубопроводной арматуры (фитингов, отводов, фланцев, задвижек, прокладок) коррозии, разрушению, снижению проницаемости для загрязнителей, минеральным отложениям, биообразованиям зависит не только от химического состава и микробного загрязнения транспортируемой воды. Стенки труб могут сами выделять в воду частицы своего компонентного состава (особенно при наличии активного хлора) и становиться подложкой для солевых отложений и биопленок [13–16]. Развитие колоний железобактерий, особенно характерное для стальных труб, приводит к увеличению содержания железа в воде, росту мутности и цветности, появлению запаха. Слой микрообразований может снижать пропускную способность водопровода за 10 лет до 50 %, что увеличивает энергозатраты на поддержание необходимого гидравлического режима. При скачках давления в сетях, а значит изменении скорости потока воды, железистые осадки отрываются и наносят урон трубопроводной арматуре и сантехническим системам потребителей.

При рассмотрении этого аспекта многие исследователи приходят к заключению о высокой надежности и безопасности труб из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. В странах ЕС и Северной Америки такие трубы приоритетны при строительстве наружных водопроводных сетей, поскольку сочетают коррозионную стойкость, свойственную полимерным трубам, и прочность, сравнимую со сталью Ст5 (https://www.abok.ru/for_spec/articles/42/8496/8496.pdf?ysclid=mdsschdrpr5714781595).

Полимерные трубы (главным образом полиэтиленовые) активно продвигаются на российском рынке ВХД. Возникает закономерный вопрос об их надежности и экологической безопасности. При этом следует отдельно рассмотреть широко обсуждаемую в научной литературе проблему загрязнения воды микропластиком. В какой мере это касается попадания микропластика в водопроводную воду при ее транспортировке?

Обсуждение проблемы опасности загрязнения воды микропластиком охватило как научные круги, так и многочисленных пользователей социальных сетей и сайтов за последнее пятилетие. С разной степенью научного обоснования высказывающие опасения о накоплении микро- и наночастиц в живых организмах, включая человека. В социальных сетях можно встретить суждения, касающиеся проникновения микропластика в желудок, плаценту, легкие и даже в кровь и повышения в ней уровня холестерина. Риск накопления микропластика в органах и тканях обычно связывают с попаданием его к человеку по пищевым цепочкам (например, из морепродуктов), реже – с недостаточно очищенной питьевой водой.

В рамках тематики статьи следует рассмотреть вопрос о возможности выделения микропластика непосредственно из труб при контакте с водопроводной водой. Экспериментально доказано, что со стенок труб из полиэтилена низкого давления, полипропилена, поливинилхлорида и других полимеров могут отрываться микрочастицы [17].

Опасность представляют не столько сами микрочастицы, сколько адсорбированные на них токсичные вещества – антропогенные загрязнители (выделяющиеся из полимеров мономеры, продукты их распада, окисления или восстановления), а также вещества, образующиеся в процессе жизнедеятельности микроорганизмов. Причинами служат старение пластика, механические повреждения водопроводных систем при пусконаладочных и ремонтных работах, контакт материала труб с агрессивными грунтами и урбанизмами, пропитанными нефтепродуктами и другими органическими загрязнителями. Для крупных городов Сибири с повышенной влажностью грунтов такая обстановка очень характерна. В целом, оценивая риск попадания микропластика в питьевую воду при ее транспортировке по полимерным сетям, можно заключить, что частицы микропластика могут появиться только при механическом воздействии во время строительных и ремонтных работ на водопроводе. Предотвратить попадание таких частиц к потребителю можно, если соблюдать соответствующие регламенты. Отметим, что мы не рассматриваем те случаи, когда микропластик попадает в водопровод вместе с недоочищенной поверхностной водой, тем более что Томск снабжается подземной водой, прошедшей очистку на станции обезжелезивания.

Заключение

В целом на всероссийском уровне наблюдается крайне тревожная ситуация, связанная с необходимостью обновления водопроводных сетей. В г. Томске установлено, что материалы, используемые в водопроводной сети, негативно влияют на качество хозяйственно-питьевой воды. Наибольшее влияние оказывают стальные и полиэтиленовые трубы. Основными факторами, негативно влияющими на качество хозяйственно-питьевой воды, являются: большая протяженность стальных трубопроводов, их длительная эксплуатация и частые ремонты, которые влекут ухудшение показателей состава и свойств питьевой воды. Особо выделяется состояние обветшавших стальных труб разводящих систем водопровода. Для улучшения качества потребляемой хозяйственно-питьевой воды рекомендовано применение бытовых очистных устройств, служащих дополнительной ступенью доочистки, особенно после перерывов в потреблении воды.

Анализ возможных технико-технологических решений для реконструкции систем водоснабжения, с учетом обозначенных в статье проблем, позволяет предложить некоторые рекомендации по комплексному подходу к их решению:

– установка узлов учета водопотребления на всех стадиях движения воды как этап последующего формирования системы мониторинга расхода и потерь в водопроводных сетях для сокращения потерь воды за счет своевременного выявления мест утечек;

– анализ структурных зависимостей водопотерь от материалов, диаметров, протяженности трубопроводов с обозначением величины утрат воды на разных этапах транспортировки и объемов полезного водопотребления;

– разработка новых композиционных материалов, которые в будущем могут вытеснить с рынка металлические и пластиковые трубы. Все больший практический интерес вызывают нанотехнологии и возможность управления свойствами материалов на уровне отдельных атомов и молекул. За рубежом ак-

тивно ведутся разработки по изготовлению многослойных труб с заданными свойствами для их внедрения в систему водоснабжения и водоотведения;

– повышение скорости и качества принятия управленческих решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Примин О.Г., Громов Г.Н. Надежность и экологическая безопасность водопроводных и водоотводящих трубопроводов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 54–61. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.04.54-61
2. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Коэффициент эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения как фактор оценки возможности продолжения дальнейшей их эксплуатации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 162–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-162-168
3. Яковлева Е.М., Чижинумов С.Д. К вопросу обеспечения надёжности водопроводных сетей // Мероприятия инженерной защиты в транспортном строительстве : материалы всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией И.А. Веприняка. Санкт-Петербург, Петергоф, 2023. С. 134–142. EDN: XPRJYZ
4. Абитов Р.Н., Селюгин А.С., Низамова А.Х. Проблемы надежности работы водопроводных сетей населенных пунктов // Энергосбережение и Водоподготовка. 2022. № 5 (139). С. 9–14. EDN: WWSZZS
5. Сфера водоснабжения и водоотведения в России: текущее состояние и пути развития : доклад Центра стратегических разработок. Москва : Фонд ЦСР, 2024. 101с.
6. Насонкина Н.Г., Антоненко С.Е., Трякина А.С., Гутарова М.Ю., Забурдаев В.С., Берёза П.Г. Анализ повреждаемости водопроводных и канализационных сетей // Современное промышленное и гражданское строительство. 2019. Т. 15. № 1. С. 23–34. EDN: PBPCVV
7. Богданова О.А., Алифанов И.В. Полимерные трубопроводы и арматура в современных системах водоподготовки // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2011. № 9 (45). С. 52–54. DOI: 10.24075/rbh.2022.043
8. Онищенко Г. Обеспечение населения чистой питьевой водой – важный фактор качества жизни людей // Основы Безопасности Жизнедеятельности. 2010. № 11. С. 20–22.
9. Мысякин А.Е., Королик В.Б. Зависимость качества питьевой воды от режимов водопользования и типов водопроводных труб // Гигиена и санитария. 2010. № 6. С. 31–33. EDN: PBPCVV
10. Сазонова О.В., Тупикова Д.С., Рязанова Т.К., Гаврюшин М.Ю., Фролова О.В., Трубецкая С.Р. К оценке качества питьевого водоснабжения различных регионов Российской Федерации // Российский вестник гигиены. 2022. № 2. С. 4–7. DOI: 10.24075/rbh.2022.043. EDN: QELYMO
11. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году : Государственный доклад. Москва : Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. 424 с.
12. Вождаева М.Ю., Холова А.Р., Вагнер Е.В., Труханова Н.В., Мельницкий И.А., Муллоджанов Т.Т., Кантор Е.А. Изменение показателей химической безвредности питьевой воды Уфы при её транспортировке потребителям // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 4. С. 396–405. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-4-396-405
13. Алексеева А.В., Савостикова О.Н., Мамонов Р.А., Каменецкая Д.Б. Изучение возможности вторичного загрязнения питьевой воды в модельных условиях, имитирующих промышленное загрязнение почвы нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Медицина труда и экология человека. 2022. № 3. С. 115–124. DOI: 10.24411/2411-3794-2022-10310
14. Черкасов С.В. Железобактерии в системах питьевого водоснабжения. URL: <https://wwtec.ru/index.php?id=418>
15. Сиренко Е.Р. Применение полипропиленовых труб в промышленном водоснабжении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 6. С. 107–110. EDN: DNBEZJ
16. Горшкалев П.А., Поршина Е.Г., Базарова А.О. Сравнительный анализ материалов труб для замены старых внутриплощадочных трубопроводов НФС г.о. Кинель // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии :

- сборник статей 79-й Всероссийской научно-технической конференции / под ред. М.В. Шувалова [и др.]. Самара, 2022. С. 500–511. EDN: ZCUOQD
17. *Homin Kye, Jiyoon Kim, Seonghyeon Ju, Junho Lee, Chaehwi Lim, Yeojoon Yoon*. Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards // *Journal of Sustainable Development*. 2013. V. 6. № 2. ISSN 1913-9063. E-ISSN 1913-9071.

REFERENCES

1. *Primin O.G., Gromov G.N.* Reliability and Environmental Safety of Water Supply and Drainage Pipelines. *Promyshlennoe i grazhdanskoestroitel'stvo*. 2021; (4): 54–61. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.04.54-61 (In Russian)
2. *Prodous O.A., Shlychkov D.I.* Efficiency Coefficient of Water Supply and Water Removal as an Assessment Factor of Further Operation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (3): 162–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-162-168 EDN: QVBNEW (In Russian)
3. *Yakovleva E.M., Chizhiumov S.D.* On the issue of reliability of water supply networks. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Engineering Protection Measures in Transport Construction'*. I.A. Verprinyak Ed. Saint-Petersburg, Peterhof, 2023. Pp. 134–142. EDN: XPRJYZ (In Russian)
4. *Abitov R.N., Selyugin A.S., Nizamova A.H.* Problems of Reliability of Water Supply Net-works in Populated Areas. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2022; 5 (139), 9–14. EDN: WWSZZS (In Russian)
5. “Water supply and sanitation in Russia: current status and development prospects”. Report by the Centre for Strategic Research. 2024. 101 p. (In Russian)
6. *Nasonkina N.G., Antonenko S.E., Tryakina A.S., Gutarova M.Yu., Zaburdaev V.S., Beryoza P.G.* Analysis of Vulnerability of Water Supply and Sewerage Networks. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdansko stroitel'stvo*. 2019; 15 (1): 23–34. EDN: PBPCVV (In Russian)
7. *Bogdanova O.A., Alifanov I.V.* Polymer Pipes and Fittings in Modern Water Treatment Systems. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2011; 9 (45): 52–54. DOI: 10.24075/rbh.2022.043 (In Russian)
8. *Onishchenko G.* Providing the Population with Clean Drinking Water is an Important Factor in Life Quality. *Osnovy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti*. 2010; (11): 20–22. (In Russian)
9. *Mysyakin A.E., Korolik V.B.* Dependence of Drinking Water Quality on Water Usage and Types of Water Pipes. *Gigiena i sanitariya*. 2010; 6: 31–33. EDN: PBPCVV (In Russian)
10. *Sazonova O.V., Tupikova D.S., Ryazanova T.K., Gavryushin M.Yu., Frolova O.V., Trubeckaya S.R.* Quality Assessment of Drinking Water Supply in Regions of the Russian Federation. *Rossijskij vestnik gigieny*. 2022; (2): 4–7. DOI: 10.24075/rbh.2022.043. EDN: QELYMO (In Russian)
11. “On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2024”, State Report. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, 2025. 424 p. (In Russian)
12. *Vozhdaeva M.Yu., Holova A.R., Vagner E.V., Truhanova N.V., Mel'nickij I.A., Mullahzhanov T.T., Kantor E.A.* Changes in Chemical Safety Indicators of Drinking Water in Ufa During its Transportation to Consumers. *Gigiena i sanitariya*. 2021; 100 (4): 396–405. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-4-396-405 (In Russian)
13. *Alekseeva A.V., Savostikova O.N., Mamontov R.A., Kameneckaya D.B.* Possibility of Secondary Contamination of Drinking Water under Model Conditions Simulating Industrial Soil Contamination with Petroleum Products and Heavy Metals. *Medicina truda i ekologiya cheloveka*. 2022; (3): 115–124. DOI: 10.24411/2411-3794-2022-10310 (In Russian)
14. *Cherkasov S.V.* Iron bacteria in drinking water supply systems. Available: wwtec.ru/index.php?id=418 (In Russian)
15. *Sirenko E.R.* Polypropylene Pipes in Industrial Water Supply. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020; (6): 107–110. EDN: DNBEZJ (In Russian)
16. *Gorshkalev P.A., Porshina E.G., Bazarova A.O.* Comparative analysis of pipe materials for replacing old on-site pipelines of the NFG in Kinel. In: *Proc. 79th All-Russ. Sci. Conf. 'Traditions and Innovations in Construction and Architecture'*. M.V. Shuvalov Ed. Samara, 2022. Pp. 500–511. EDN: ZCUOQD (In Russian)

17. *Homin Kye, Jiyoon Kim, Seonghyeon Ju, Junho Lee, Chaehwi Lim, Yeojoon Yoon.* Microplastics in Water Systems: A Review of Their Impacts on the Environment and Their Potential Hazards. *Journal of Sustainable Development.* 2013; 6 (2). ISSN 1913-9063. E-ISSN 1913-9071.

Сведения об авторах

Лукашевич Ольга Дмитриевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, odluk@yandex.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. геол.-мин. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kyky60@bk.ru

Authors Details

Olga D. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia, odluk@yandex.ru

Elena Yu. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia, kyky60@bk.ru

Вклад авторов

Лукашевич О.Д. – концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; заключение.

Осипова Е.Ю. – участие в подборе и анализе литературы; обработка данных и построение диаграмм; доработка текста; предварительные и итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Lukashevich O.D. – conceptualization, methodology, writing-original draft preparation, conclusions.

Osipova E.Yu. – literature review, data processing, visualization, writing-review and editing, conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.08.2025
Одобрена после рецензирования 20.08.2025
Принята к публикации 03.09.2025

Submitted for publication 01.08.2025
Approved after review 20.08.2025
Accepted for publication 03.09.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 172–186.

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 (6): 172–186.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-172-186

EDN: YVIVCY

ОПТИМИЗАЦИЯ СИНТЕЗА МУЛЛИТА В ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКАНИЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ И ЧИСТЫХ ОКСИДОВ

**Валентин Валерьевич Шеховцов, Марк Андреевич Семеновых,
Ахрорбек Боходиржон Улмасов, Дарья Сергеевна Дятчина,
Екатерина Алексеевна Анисимова**

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

Аннотация. Развитие водородной металлургии и производства специальных сталей предъявляет повышенные требования к термомеханическим и химическим свойствам огнеупоров. Исследование посвящено решению актуальной научно-технической задачи, связанной с разработкой перспективных муллитсодержащих материалов для высокотемпературных применений в условиях экстремальных энергетических воздействий.

Материалы и методы. Экспериментально установлены оптимальные параметры плазменно-дугового синтеза муллита (сила тока 80–90 А, время воздействия 15–25 с), обеспечивающие формирование монолитных сферических продуктов с минимальной дефектностью. Методами рентгеновской дифракции и компьютерной томографии выявлен механизм изоморфного замещения в условиях плазменного воздействия, приводящий к образованию нестехиометрических твердых растворов на основе корунда.

Результаты. Проведен сравнительный анализ спекания материалов на основе природного сырья и чистых оксидов, установивший принципиальные различия в механизмах уплотнения. Показано, что керамика из чистых оксидов уплотняется за счет объемной диффузии с образованием равноосной структуры, размер зерна ($3,2 \pm 0,5$) мкм, в то время как природные материалы спекаются через жидкокристаллический механизм с формированием игольчатых кристаллов муллита. Определены температурные режимы спекания: для керамики из

чистых оксидов основной прирост плотности достигается при 1400–1500 °C, тогда как природные материалы требуют температур 1500–1550 °C для интенсивного уплотнения.

Результаты. В результате исследований плазменно-дугового синтеза муллита содержащих материалов установлено, что экстремальные условия плазмы (5000–7000 °C) индуцируют сложные физико-химические процессы, а оптимальный режим при силе тока 80–90 А обеспечивает формирование монолитных сферических продуктов с минимальной дефектностью. Установлены параметры энергетического воздействия на структурно-фазовые характеристики и свойства конечного продукта. Полученные результаты имеют практическую значимость для создания энергоэффективных керамических материалов с заданными структурно-функциональными характеристиками.

Ключевые слова: муллит, спекание, структурно-фазовые превращения, изоморфное замещение

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20237 (<https://rscf.ru/project/25-29-20237/>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (Соглашение № 02/4/2025).

Для цитирования: Шеховцов В.В., Семеновых М.А., Улмасов А.Б., Дятчина Д.С., Анисимова Е.А. Оптимизация синтеза муллита в плазменно-дуговом разряде и сравнительный анализ спекания керамики на основе природного сырья и чистых оксидов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 172–186. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-172-186. EDN: YVIVCY

ORIGINAL ARTICLE

OPTIMIZATION OF MULLITE SYNTHESIS IN ARC DISCHARGE PLASMA AND COMPARISON OF CERAMICS SINTERING BASED ON NATURAL RAW MATERIAL AND PURE OXIDE

Valentin V. Shekhovtsov, Mark A. Semenovych, Akhrorbek B. Ulmasov,
Daria S. Dyatchina, Ekaterina A. Anisimova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The development of hydrogen metallurgy and production of special steels place increased demands on thermomechanical and chemical properties of refractories. This work addresses a pressing scientific and technical challenge relating to the development of promising mullite-containing materials for high-temperature applications under extreme energy conditions.

Purpose: Arc synthesis plasma of mullite-containing materials.

Methodology/approach: The best parameters of mullite synthesis in arc discharge plasma at 80–90 А current and 15–25 s exposure, are detected empirically, ensuring the formation of monolithic spherical products with the lowest number of defects. X-ray diffraction and computed tomography are used to identify the isomorphic substitution mechanism, leading to the formation of non-stoichiometric corundum-based solid solutions. A comparative analysis of sintering ceramics based on natural raw materials and pure oxide shows fundamental differences in the compaction mechanism. It is shown that ceramics made of pure oxides compacts through the volume diffusion, forming the equiaxed structure (grain size: $3.2 \pm 0.5 \mu\text{m}$), while natural materials sinter through a liquid-phase mechanism, forming acicular mullite crystals. The sintering temperature is 1400 to 1500 °C for pure oxide ceramics. The main density increase is achieved in this temperature range, while natural materials require temperatures of 1500 to 1550 °C for an intensive compaction.

Research findings: Arc synthesis plasma of mullite-containing materials shows that extreme plasma conditions (5000–7000 °C) induce complex physicochemical processes, while the best current ranges between 80 and 90 Å. It ensures the formation of monolithic spherical products with the lowest number of defects. Parameters are determined for the energy impact on the structure, phase composition and properties of the final product.

Practical implication: The obtained results have practical significance for the creation of energy-efficient ceramic materials with specified structural and functional properties.

Keywords: mullite, sintering, structure and phase transformation, isomorphic substitution

Funding: this research was financially supported by Grant No. 25-29-20237 from the Russian Science Foundation and Grant No. 02/4/2025 from the Department of Science and Technology Development and Innovative Activities of the Tomsk Region.

For citation: Shekhovtsov V.V., Semenovskikh M.A., Ulmasov A.B., Dyatchina D.S., Anisimova E.A. Optimization of Mullite Synthesis in Arc Discharge Plasma and Comparison of Ceramics Sintering Based on Natural Raw Material and Pure Oxide. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 172–186. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-172-186. EDN: YVIVCY

Введение

Современные высокотемпературные технологические процессы, такие как водородная металлургия, производство цемента и выплавка специальных сталей, предъявляют повышенные требования к термомеханическим и химическим свойствам огнеупорных материалов. В частности, акцент смещается в сторону разработки материалов, способных работать в агрессивных средах, обладающих пористой структурой для снижения теплопроводности и пригодных для аддитивных технологий. Муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и материалы на его основе являются одними из ключевых в данной области благодаря сочетанию высокой температурной стабильности, механической прочности и коррозионной стойкости.

Актуальным является исследование поведения муллитсодержащих огнеупоров в восстановительных атмосферах, в частности в водороде, для моделирования условий перспективных процессов безуглеродной металлургии. Показано [1], что воздействие 100 % H_2 при 1100 °C в течение 72 ч приводит к заметной деградации свойств материалов на основе муллита и андалузита. Другое перспективное направление – создание высокопористых теплоизоляционных материалов с улучшенными механическими характеристиками. Так, применение пенотехнологии с использованием добавок оксида иттрия (Y_2O_3) позволяет синтезировать пористый муллит, упрочненный диоксидом циркония (ZrO_2). Добавка 6 масс. % Y_2O_3 способствует фазовому переходу ZrO_2 из моноклинной в тетрагональную фазу, уменьшает средний размер пор до 119 мкм и обеспечивает высокие механические свойства: прочность на холодное сжатие 35,2 МПа и прочность на изгиб 13,0 МПа при низкой теплопроводности 0,248 Вт/(м·К) [2]. Альтернативный подход к формированию пористой структуры – использование метода одноосного прессования с последующим спеканием – позволил получить муллитовую керамику с прочностью на сжатие до 150 МПа и кажущейся пористостью 35 % [3].

Важнейшим аспектом является повышение химической стойкости огнеупоров, особенно в условиях воздействия щелочных паров в цементных печах.

Установлено [4], что введение хвостов кианита в низкосортное бокситовое сырье способствует формированию столбчатой или таблитчатой, а не игольчатой структуры муллита. Это позволяет лучше окружить муллитовые кристаллы богатой кремнеземом стеклофазой, что переводит процесс щелочной коррозии с газо-твердофазного на механизм растворение-осаждение. Образующаяся жидкая фаза уплотняет коррозионный слой, эффективно препятствуя дальнейшему проникновению щелочных паров и улучшая стойкость материала.

В контексте современных производственных технологий исследуются реологические свойства составов для 3D-печати огнеупоров. Показано, что суспензии на основе кварцевого стекла с кварцевым наполнителем демонстрируют нелинейное вязкопластическое течение, что делает их перспективными в качестве чернил для экструзии, в то время как составы с муллитовым, шпинелевым и корундовым наполнителями проявляют дилатантный характер течения, затрудняющий их использование [5].

Для литых огнеупоров ключевым фактором, определяющим их эксплуатационные свойства (коррозионную стойкость и склонность к образованию дефектов), является состав и количество стеклофазы. Снижение содержания стеклофазы и увеличение доли ZrO_2 в бадделеит-корундовых огнеупорах повышает их коррозионную стойкость, но усложняет режимы отжига. Свойства стеклофазы зависят от соотношения SiO_2/Na_2O , чистоты сырья и метода плавки шихты [6].

Общим трендом в разработке рабочих футеровок высокотемпературных печей является использование легких огнеупоров, основой для которых служат легкие заполнители. Активные исследования ведутся в области синтеза высококрочных, термостабильных заполнителей на основе корунда, муллита, шпинели, кордиерита, гексаалюмината кальция и других соединений с низкой теплопроводностью и высокой шлакостойкостью [7].

Современные технологии синтеза высокотемпературных керамических материалов, в частности на основе системы $Al_2O_3-SiO_2$, все чаще сталкиваются с необходимостью обеспечения контролируемого неравновесного взаимодействия в условиях экстремальных энергетических нагрузок. Плазменно-дуговой разряд представляет собой один из наиболее перспективных методов, сочетающих высокую плотность энергии (до $10^6-10^8 \text{ Вт}/\text{м}^2$), сверхвысокие температуры (5000–7000 °C) и высокую скорость нагрева, что позволяет реализовывать неравновесные фазовые превращения, недоступные в традиционных термических процессах [8]. Однако именно эти особенности обуславливают высокую динамичность и нестационарность процесса, проявляющиеся в интенсивных флуктуациях электрических параметров, резких гидродинамических перестройках расплава и сложных механизмах массо- и теплопереноса [9].

В условиях плазменно-дугового воздействия на муллит происходят сопряженные физико-химические процессы: термическое разложение исходной структуры с последующим плавлением; диффузионное перемешивание компонентов в расплаве при значительных градиентах температуры и вязкости; интенсивное газовыделение за счет дегазации и термической диссоциации примесей; формирование пересыщенного расплава, из которого при охлаждении кристаллизуются метастабильные или нестехиометрические фазы; изоморфное замещение в кристаллических решетках ($Si^{4+} \leftrightarrow Al^{3+}$), приводящее к искажению

элементарной ячейки и возникновению структурных дефектов. Эти процессы протекают в условиях сильной неравновесности, обусловленной как высокой скоростью нагрева/охлаждения, так и пространственной неоднородностью плазменного потока. В результате морфология, фазовый состав и микроструктура конечного продукта оказываются чрезвычайно чувствительными к таким параметрам, как сила тока, время воздействия и режим охлаждения.

Представленные в настоящей работе результаты направлены на установление причинно-следственных связей между режимами плазменно-дуговой обработки и структурно-фазовыми характеристиками синтезируемого муллита. Особое внимание удалено следующим аспектам: эволюции морфологии и плотности продуктов плавления в зависимости от энергетического режима; визуализации нестационарных гидродинамических явлений (кипение, конвекция Бенара); анализу фазовых превращений и изоморфного замещения по данным рентгеновской дифракции; оценке спекаемости порошковых материалов, полученных плазменным синтезом. Такой комплексный подход позволяет не только оптимизировать технологические параметры, но и детально изучить фундаментальные механизмы формирования функциональных керамических материалов в условиях экстремального энерговоздействия.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья использовались два типа композиций.

1. Природное сырье – кварцевая мука Туганского месторождения с содержанием $\text{SiO}_2 \geq 98,2\%$ (основные примеси: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO) и бёмит ($\gamma\text{-AlO(OH)}$) Северо-Уральского региона теоретическим содержанием Al_2O_3 84,97 %. Кварцевая мука характеризовалась средней плотностью 2900 кг/м³. Бёмит имел плотность 3060 кг/м³ и содержал примеси Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , а также оксиды кальция, магния, щелочных металлов, галлия и скандия. Фракционный состав всех материалов соответствовал размеру частиц 0,08 мм.

2. Синтетическая смесь оксидов квалификации «химически чистый» (х.ч.) – Al_2O_3 по ГОСТ 3758–75 и SiO_2 по ГОСТ 9428–73.

Соотношение компонентов в обеих системах соответствовало стехиометрии муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Для обеспечения заданного фазового состава расчет массовых долей оксидов проводили на основе молярных соотношений, что обеспечивало теоретическое содержание Al_2O_3 в стехиометрическом муллите, равное 71,8 масс. %, и SiO_2 – 28,2 масс. %.

Плавление и синтез муллита проводились методом электродугового плазменного плавления с использованием экспериментальной установки [10–14]. В качестве варьируемого параметра использовалась сила тока в диапазоне 60–100 А, что позволяло регулировать энергетическое воздействие на материал. Время обработки (5–30 с) изменялось для изучения кинетики плавления и кристаллизации. Визуализация динамики процессов осуществлялась с помощью монохромной цифровой камеры НТ-SUA130GM-T со скоростью съемки 900 кадров в минуту.

Фазовый состав и структурные параметры определялись с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-7000 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Регистрация проводилась в интервалах углов $2\theta = 25\text{--}27^\circ$ и $34\text{--}36^\circ$ (шаг сканирования $0,02^\circ$ и время экспозиции в точке 1 с), что соответствует характерным

пикам муллита и корунда. Количественный фазовый анализ выполнен методом Ритвельда с использованием базы данных ICDD PDF-4+. Микроструктура и распределение пор анализировались методом рентгеновской микрокомпьютерной томографии на JIN GT со следующими параметрами сканирования: напряжение – 60 кВ, ток – 2,5 мА.

Для сравнительного анализа спекаемости порошкового материала, полученного на основе продуктов плазменного синтеза, использовали высокотемпературную печь в температурном диапазоне 1400–1550 °С. Следующий режим тепловой обработки – нагрев до 1200 °С со скоростью 100 °С/ч, далее до максимальной температуры 1550 °С – 50 °С/ч, выдержка при 1550 °С в течение 2 ч, охлаждение (естественное). Плотность, открытую пористость и водопоглощение спеченных образцов определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 2409–2014. Перед измерениями образцы высушивали при 110 °С в течение 5 ч до постоянной массы, после чего насыщали водой в вакууме в течение 30 мин.

Зависимость морфологии и структурной однородности продуктов плавления муллита от параметров плазменно-дугового воздействия

В процессе работы были получены экспериментальные данные, иллюстрирующие зависимость времени полного плавления муллита от силы тока дугового разряда (рис. 1, *а*). При увеличении тока с 60 до 100 А наблюдается изменение морфологии синтезированных продуктов. Следует отметить, что в данный период происходит полный переход исходного материала в расплавленное состояние: непрореагировавшие исходные частицы не обнаруживаются.

При токах 60–70 А продукт состоит из агрегатов неправильной угловой формы или каплевидных частиц с высокой степенью неоднородности (рис. 1, *а*). Данные томографии (рис. 1, *б*) подтверждают это: наблюдается высокая пористость, неоднородность плотности и газовые пузыри полимодального размера (от 10 мкм до 5 мм). Такая структура свидетельствует о недостаточной энергии плазмы для полного и равномерного перегрева расплава. Высокая вязкость расплава в этих условиях не только препятствует действию сил поверхностного натяжения, но и снижает интенсивность перемешивания, что затрудняет удаление газовых включений. Формирование монолитного сферического продукта наблюдается в оптимальном режиме и соответствует силе тока 80–90 А (рис. 1, *а*). В данном случае энергия плазмы обеспечивает полное плавление, снижая вязкость расплава до уровня, достаточного для доминирования сил поверхностного натяжения и эффективного удаления газовой фазы. Томографические срезы (рис. 1, *б*) демонстрируют, что продукт плавления, синтезированный в этом режиме, характеризуется высокой плотностью и монолитностью (отсутствует распределение больших пор по объему). При дальнейшем увеличении тока до 100 А происходит резкий перегрев расплава из-за избыточной энергии плазмы. Это вызывает интенсивное кипение, связанное с выделением газов из объема расплава, что разрушает сферичность продукта плавления и целостность его поверхности (рис. 1, *а*).

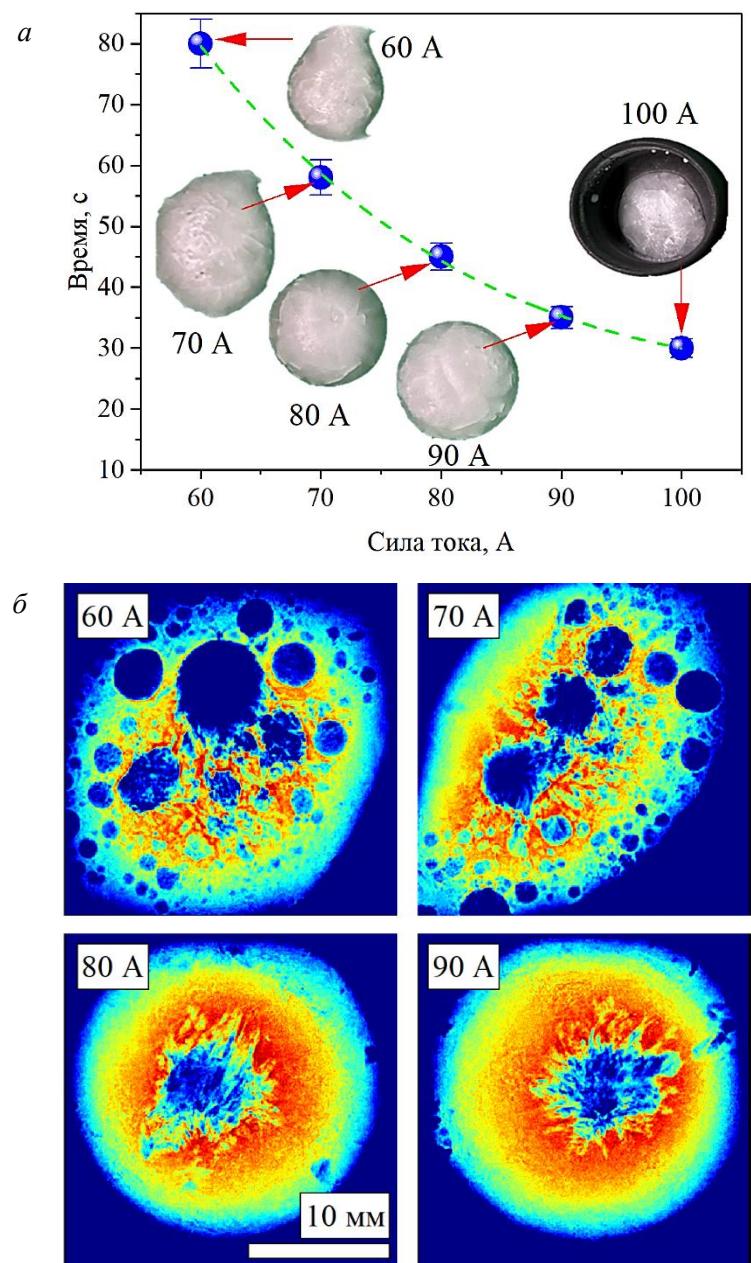


Рис. 1. Влияние силы тока плазменно-дугового разряда на характерное время полного плавления муллита (а); томографическая визуализация структуры продуктов плавления (б)

Fig. 1. The influence of discharge current on mullite complete melting time (a) and computed tomography of the structure of melting products (b)

Количественный анализ томографических данных выявил, что образцы, полученные при токах 80–90 А, характеризуются не только высокой общей плотностью, но и оптимальным распределением остаточной пористости, которая соди-

рается в центре продукта плавления. Объемная доля изолированных пор составляет $(92 \pm 3)\%$. Средний размер пор не превышает 15 мкм, при этом отсутствуют поры размером более 500 мкм, являющиеся концентраторами напряжений.

Визуализация нестационарных явлений в расплаве муллита под действием плазмы дугового разряда

Стоп-кадры высокоскоростной видеосъемки фиксируют кипение капли расплава при токе 100 А (рис. 2, *a*). На них видно, что, в то время как на периферии происходило активное кипение и выход газов, в центре капли расплав продолжает циркулировать. Обильное газовыделение приводит к захвату пузырей в объеме расплава. Нестационарный характер газовыделения в процессе кипения приводит к превышению давления растущих газовых пузырей над силой поверхностного натяжения, что вызывает фрагментацию капли, потерю массы и формирование высокодефектного продукта плавления.

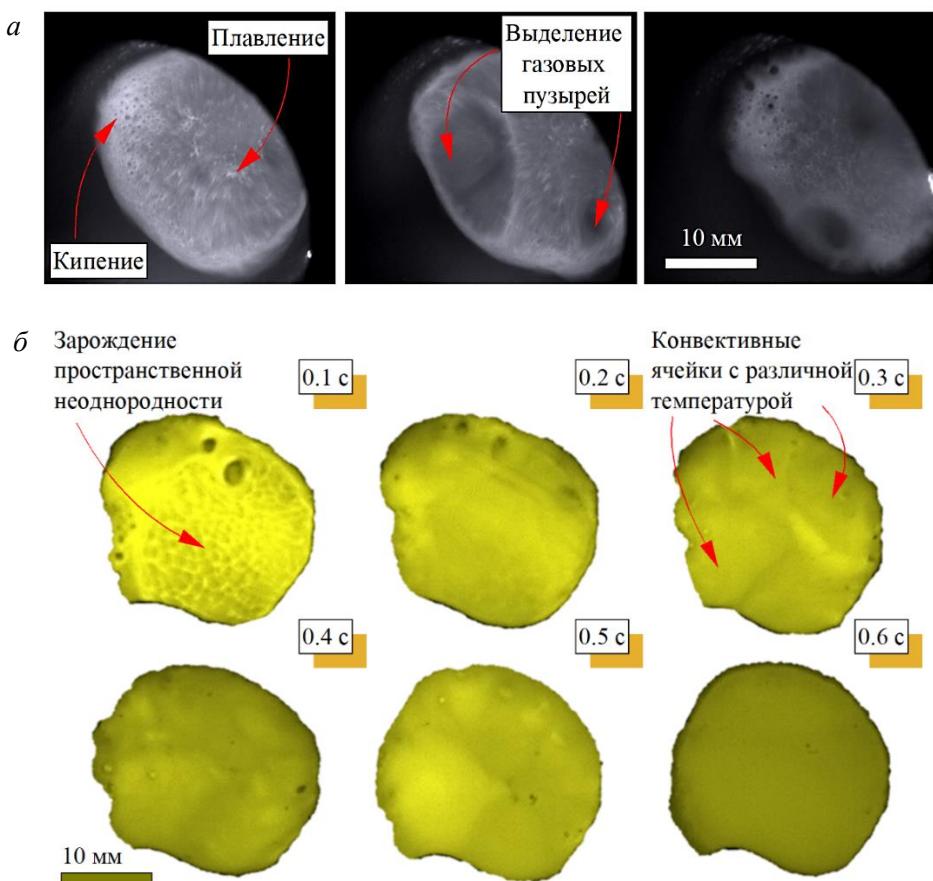


Рис. 2. Визуализация динамики поведения расплава при воздействии плазменного потока:
а – стадии кипения капли (сила тока 100 А); *б* – процесс охлаждения и твердения (сила тока 80 А)

Fig. 2. Dynamics of the melt behavior in a plasma flow:
a – droplet boiling at 100 A current; *b* – cooling and solidification at 80 A current

На стоп-кадрах процесса охлаждения расплава (рис. 2, б) зафиксирован переход от ламинарного к конвективному режиму остывания расплава после воздействия плазменного потока. Процесс начинается с быстрого зарождения мелкомасштабной пространственной неоднородности ($\sim 1-3$ мм), которая эволюционирует в четко выраженные конвективные ячейки Бенара размером до 10 мм [15]. Эти ячейки указывают на градиенты температуры: горячий расплав поднимается в их центре, а охлаждённый опускается по границам. Процесс имеет динамичный характер: ячейки постоянно и динамически сливаются, что свидетельствует о сложном неравновесном тепло- и массопереносе.

**Фазовая перестройка и изоморфное замещение
в продуктах плазменного синтеза муллита
при варьировании времени обработки**

Полученные экспериментальные рентгеновские дифрактограммы в интервалах $2\theta = 25-27^\circ$ и $34-36^\circ$ (рис. 3, а), а также количественное содержание кристаллических фаз (рис. 3, б) в зависимости от времени воздействия плазменного потока при силе тока 80 А позволяют проследить фазовые превращения.

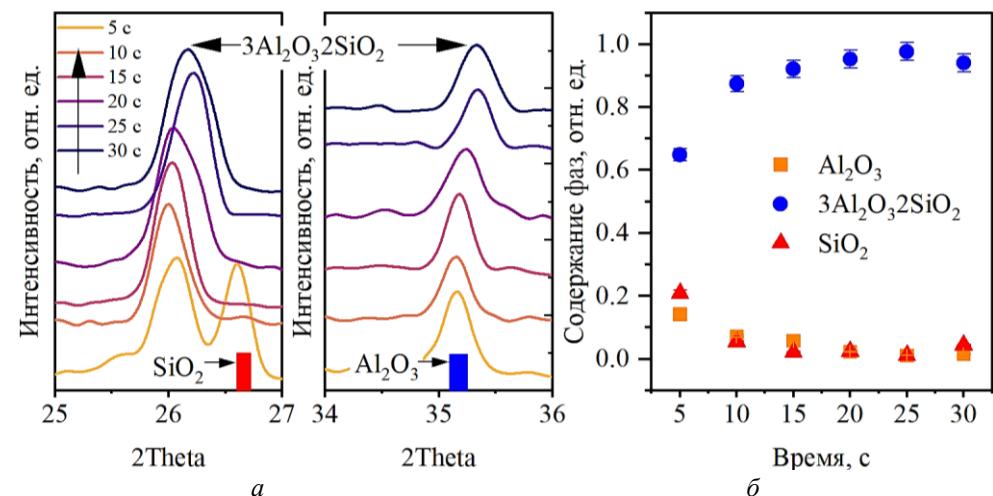


Рис. 3. Влияние времени плазменного воздействия на фазовый состав продуктов синтеза (ток 80 А):

а – фрагменты рентгеновских дифрактограмм в интервалах $2\theta = 25-27^\circ$ и $34-36^\circ$;

б – результаты количественного фазового анализа

Fig. 3. Dependences between the exposure time and phase composition of synthesis products at 80 A discharge current:

а – XRD patterns at $2\theta = 25-27$ degrees and 34–36 degrees; б – quantitative phase analysis

В ходе плазменной обработки муллита реализуется эволюционный переход от твердофазного спекания к плавлению, зависящий от времени воздействия. При кратковременном облучении доминирует твердофазный механизм, сопровождающийся диффузионными перестройками и частичной аморфизацией структуры. По мере увеличения продолжительности воздействия достигаются температуры, достаточные для полного плавления исходного материала

с формированием аморфного расплава. При последующем охлаждении из пересыщенного расплава кристаллизуется муллит – термодинамически устойчивая фаза в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ при данных условиях.

Кристаллические решетки муллита и корунда допускают изоморфное замещение катионов, что проявляется при внедрении ионов различного размера – например, Si^{4+} в октаэдрические позиции решетки корунда или Al^{3+} в тетраэдрические/октаэдрические позиции муллита. Учитывая, что ионный радиус Si^{4+} в тетраэдрической координации составляет 0,040 нм, а ионный радиус Al^{3+} в октаэдрической координации – 0,0535 нм, замещение Al^{3+} на более мелкий Si^{4+} приводит к сжатию кристаллической решетки, тогда как обратное внедрение – к ее расширению [16]. В соответствии с законом Брэгга, сжатие решетки вызывает смещение дифракционных пиков в область больших углов 2θ , а расширение – в область меньших углов. Для количественной оценки степени изоморфного замещения был проведен расчет параметров элементарной ячейки по методу Нельсона – Райли [17]. Установлено, что при времени плазменного воздействия 20 с параметр элементарной ячейки корунда уменьшается с 0,4761 до 0,4758 нм, что соответствует замещению приблизительно 2,3 % катионов Al^{3+} на Si^{4+} .

Анализ рентгенограмм образцов, подвергнутых плавлению в течение различного времени, выявил систематическое смещение дифракционных пиков корунда в диапазонах $2\theta = 25\text{--}27^\circ$ (отражение (113)) и $2\theta = 34\text{--}36^\circ$ (отражение (116)). При увеличении продолжительности плавления наблюдается сдвиг пиков в сторону больших углов 2θ , что свидетельствует о сжатии элементарной ячейки корунда. Данное сжатие объясняется внедрением в его решетку катионов Si^{4+} , имеющих меньший ионный радиус по сравнению с Al^{3+} . Таким образом, смещение дифракционных максимумов служит чувствительным индикатором формирования нестехиометрических твердых растворов на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, а также возникновения структурных дефектов, обусловленных интенсивным межкатионным взаимодействием Al^{3+} и Si^{4+} в условиях неравновесности, создаваемых плазменным воздействием.

Влияние температуры обжига на структурную эволюцию керамики на основе природного сырья и чистых оксидов

В ходе исследования были получены экспериментальные данные изменения плотности, открытой пористости и водопоглощения керамических образцов в зависимости от температуры обжига в диапазоне от 1400 до 1550 $^\circ\text{C}$ (рис. 4). Образцы представлены двумя типами керамики: на основе природного сырья 1 и на основе чистых оксидов 2. Наблюдается закономерный рост плотности образцов с повышением температуры обжига для обоих типов керамики, однако динамика процесса и конечные результаты существенно различаются.

Плотность керамики на основе природного сырья увеличивается наиболее значительно: с $\sim 2,0 \text{ г}/\text{см}^3$ при 1400 $^\circ\text{C}$ до $\sim 2,5 \text{ г}/\text{см}^3$ при 1550 $^\circ\text{C}$. Такой резкий прирост плотности свидетельствует об активном протекании процессов спекания в данном температурном интервале, вероятно, с участием жидкой фазы, образованной примесными компонентами сырья. Плотность также возрастает с температурой, но абсолютный прирост менее выражен: с $\sim 2,2 \text{ г}/\text{см}^3$ при 1400 $^\circ\text{C}$ до $\sim 2,4 \text{ г}/\text{см}^3$ при 1550 $^\circ\text{C}$. Важно отметить, что, несмотря на мень-

шую динамику прироста, образец 2 на всех этапах обжига демонстрирует более высокие абсолютные значения плотности по сравнению с образцом 1. Это указывает на то, что керамика на основе чистых оксидов начинает активно уплотняться при более низких температурах и достигает высоких значений плотности на ранних стадиях спекания. Менее значительный прирост в высокотемпературной области объясняется приближением плотности к теоретическому пределу для данной фазы.

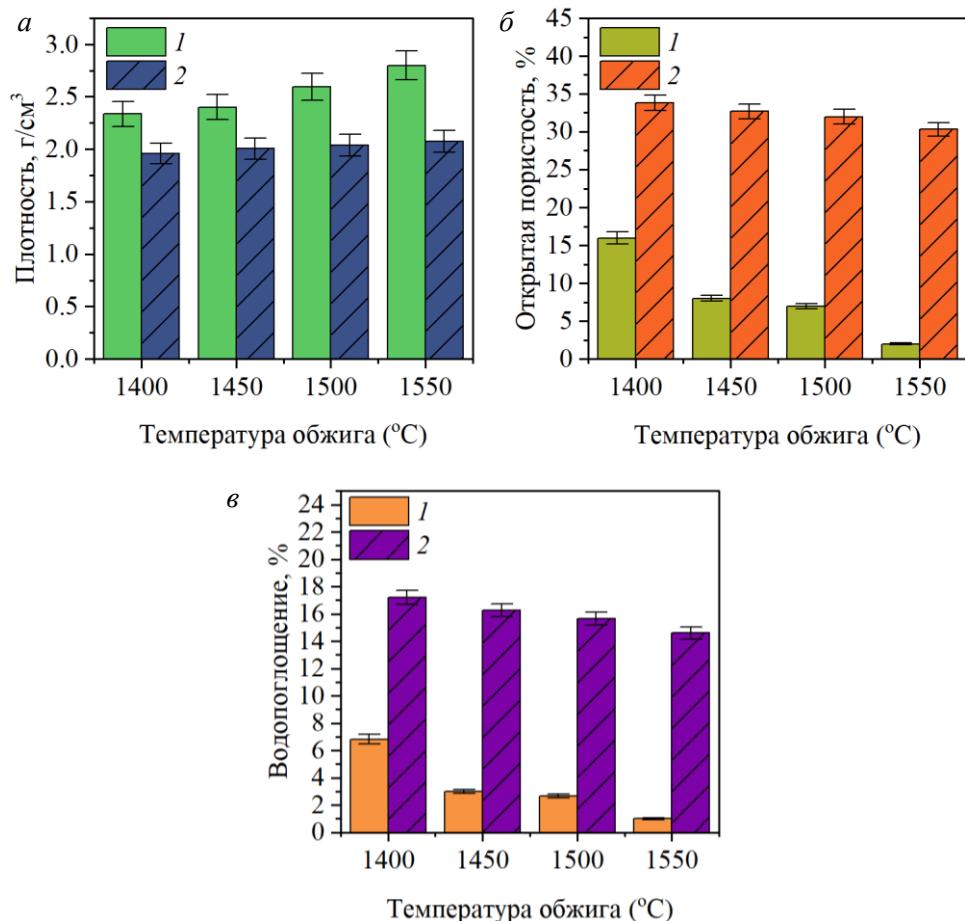


Рис. 4. Изменение характеристик керамических образцов (плотность, открытая пористость и водопоглощение) от температуры обжига 1400–1550 °C:

1 – керамика на основе природного материала; 2 – керамика на основе чистых оксидов

Fig. 4. Block diagram of ceramics properties (density, open porosity, water absorption) and burning at 1400–1550 °C:

1 – natural material based ceramics; 2 – pure oxide based ceramics

Зависимость открытой пористости и водопоглощения от температуры обжига для исследованных образцов демонстрирует общий тренд на уплотнение структуры. Однако динамика этих изменений имеет принципиальные различия.

Для керамики на основе природного материала 1 наблюдается интенсивное снижение открытой пористости с 15,9 % при 1400 °C до 2 % при 1550 °C и, соответственно, резкое падение водопоглощения с 6,8 до ≥ 1 %. В то же время керамика на основе чистых оксидов 2 характеризуется менее значительным уменьшением открытой пористости (с 30 до 30,1 %) и водопоглощения (с 17,2 до 14,6 %) в том же температурном интервале.

Сравнительный анализ микроструктуры спеченных образцов выявил принципиальные различия в механизмах уплотнения. В керамике на основе чистых оксидов преобладает объемная диффузия с образованием изометрического каркаса (средний размер зерна $(3,2 \pm 0,5)$ мкм), а в материале из природного сырья наблюдается жидкофазное спекание с формированием вытянутых игольчатых зерен муллита длиной до 25 мкм. Стоит отметить, что формируемая микроструктура в керамике на основе природных материалов, несмотря на более высокую начальную плотность, может характеризоваться анизотропией механических свойств и повышенной склонностью к хрупкому разрушению вдоль границ зерен.

Заключение

В результате комплексного исследования процессов плазменно-дугового синтеза и последующего спекания муллита содержащих материалов установлены закономерности, связывающие параметры энергетического воздействия со структурно-фазовыми характеристиками и функциональными свойствами конечных продуктов. Показано, что экстремальные условия плазменного воздействия (сверхвысокие температуры 5000–7000 °C, высокие градиенты нагрева/охлаждения) индуцируют сложные физико-химические процессы, включающие термическое разложение, плавление, изоморфное замещение и неравновесную кристаллизацию. Установлено, что морфология и структура продуктов плавления критически зависят от энергетических параметров плазменного разряда, при этом оптимальный режим (80–90 А) обеспечивает формирование монолитных сферических продуктов с минимальной дефектностью. Перечислим и конкретизируем результаты работы.

1. Оптимальные параметры плазменно-дугового синтеза муллита: сила тока 80–90 А и время воздействия 15–25 с обеспечивают получение монолитных сферических частиц с объемной долей изолированных пор (92 ± 3) % и средним размером пор менее 15 мкм.

2. Выявлен механизм изоморфного замещения в условиях плазменного воздействия: при времени обработки 20 с параметр элементарной ячейки кокурнда уменьшается с 0,4761 до 0,4758 нм, что соответствует замещению $\sim 2,3$ % катионов Al^{3+} на Si^{4+} и свидетельствует об образовании нестехиометрических твердых растворов.

3. Различия в механизмах спекания: керамика на основе чистых оксидов уплотняется за счет объемной диффузии с образованием равноосной структуры (размер зерна $(3,2 \pm 0,5)$ мкм), в то время как природные материалы спекаются через жидкофазный механизм с формированием игольчатых кристаллов муллита длиной до 25 мкм.

4. Температурные режимы спекания: для керамики из чистых оксидов основной прирост плотности достигается при 1400–1500 °С, тогда как природные материалы требуют температур 1500–1550 °С для интенсивного уплотнения, что связано с необходимостью образования жидкой фазы.

Результаты работы имеют важное практическое значение для разработки перспективных огнеупорных материалов с заданными свойствами, оптимизации технологических параметров плазменного синтеза и создания энергоэффективных керамических материалов для высокотемпературных применений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вандрай С.Н., Зайчук Т.В., Устинова Ю.С., Орлов А.А., Лемешев Д.О. Кордierитовая стеклокерамика для изделий радиотехнического назначения // Стекло и керамика. 2019. № 9. С. 17–23.
2. Лесников А.К., Лесников, П.А. Тюрнина З.Г. Стеклокерамика на основе диоксида кремния, как перспективный материал для использования в атомной энергетике // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48. № 4. С. 428–450. DOI: 10.31857/S0132665122040096. EDN: BRSPQS
3. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щеголева Н.Е., Орлова Л.А., Суздальцев Е.И. Радиопрозрачная стеклокерамика на основе стронцийалюмосиликатного стекла // Огнеупоры и техническая керамика. 2016. № 6. С. 31–37.
4. Бурдаев П.А., Асеев В.А., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Трофимов А.О. Наноструктурированная стеклокерамика на основе фторофосфатных стекол с квантовыми точками PbSe // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41. № 1. С. 173–177.
5. Han D., Zhang J., Liu P., Li G., An L., Wang S. Preparation of high-quality transparent Al-rich spinel ceramics by reactive sintering // Ceram. Int. 2018. № 44 (3). Р. 3189–3194. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.089 (дата обращения: 10.10.2025).
6. Waetzig K., Krell A. The effect of composition on the optical properties and hardness of transparent Al-rich $MgO \cdot nAl_2O_3$ spinel ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2016. № 99 (3). Р. 946–953. DOI: 10.1111/jace.14032
7. Хомидов Ф.Г., Кадырова З.Р., Усманов Х.Л., Нязова Ш.М., Сабиров Б.Т. Особенности синтеза алюмомагниевой шпинели золь–гель методом // Стекло и керамика. 2021. Т. 94. № 6. С. 48–52.
8. Nećina V., Pabst W. Comparison of the effect of different alkali halides on the preparation of transparent $MgAl_2O_4$ spinel ceramics via spark plasma sintering (SPS) // J. Eur. Ceram. Soc. 2020. № 40 (15). Р. 6043–6052. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.06.056
9. Pappas J.M., Thakur A.R., Kinzel E.C., Dong X. Direct 3D printing of transparent magnesium aluminate spinel ceramics // J. Laser Appl. 2020. № 33 (1). URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/13/21/4810?utm_source=researchgate.net&medium=article (дата обращения: 10.10.2025).
10. Абзаев Ю.А., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Исследование процессов плавления кварцевого песка с помощью энергии низкотемпературной плазмы // Стекло и керамика. 2015. Т. 88. № 6. С. 44–46.
11. Шеховцов В.В., Абзаев Ю.А., Волокитин О.Г., Скрипникова Н.К., Клопотов А.А. Особенности структурно-фазового состояния природного магнезита $MgCO_3$ в диапазоне температур 1173–6500 К // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 7 (776). С. 73–78.
12. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Гафаров Р.Е. Синтез муллитсодержащей керамики в среде низкотемпературной плазмы // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48. № 5. С. 630–634. DOI: 10.31857/S0132665121100619
13. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Улмасов А.Б. Синтез алюмомагнезиальной керамики $MgAl_2O_3$ в среде термической плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 138–146. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-138-146
14. Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Ушков В.А., Зорин Д.А. Получение стеклокерамики системы MgO – SiO_2 методом плазменной плавки // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 24. С. 15–18. DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54017.19278

15. Plawsky J. Flow visualization glass-ceramic: Preliminary experimental and modelling results // *J. Mater Sci.* 1992. № 27. P. 2501–2514. DOI: 10.1007/BF01105063
16. Shannon R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides // *Acta Cryst.* 1976. A 32. P. 751–767. DOI: 10.1107/S0567739476001551
17. Dippong T., Levei E.A., Deac I.G., Lazar M.D., Cadar O. Influence of SiO₂ Embedding on the Structure, Morphology, Thermal, and Magnetic Properties of Co_{0.4}Zn_{0.4}Ni_{0.2}Fe₂O₄ Particles // *Nanomaterials.* 2023. № 13. P. 527. DOI: 10.3390/nano13030527

REFERENCES

1. Vandrai S.N., Zaichuk T.V., Ustinova Yu.S., et al. Cordierite Glass Ceramics for Radio Engineering Applications. *Steklo i keramika.* 2019; 9: 17–23. (In Russian)
2. Lesnikov A.K., Lesnikov, P.A. Tyurnina Z.G. Glass Ceramics Based on Silicon Dioxide as a Promising Material for Use in Nuclear Power Engineering. *Glass Physics and Chemistry.* 2022; 48 (4): 285–302.
3. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Shchegoleva N.E., et al. Radio-Transparent Glass Ceramics Based on Strontium Alumino-silicate Glass. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika.* 2016; 6: 31–37. (In Russian)
4. Burdaev P.A., Kolobkova E.V., Aseev V.A., Nikonorov N.V., Trofimov A.O. Nanostructured Glass Ceramics Based on Fluoro-phosphate Glass with a High Content of Rare-Earth Ions. *Glass Physics and Chemistry.* 2015; 41 (1): 132–136.
5. Han D., Zhang J., Liu P., Li G., An L., Wang S. Preparation of High-Quality Transparent Al-Rich Spinel Ce-ramics by Reactive Sintering. *Ceramics International.* 2018; 44 (3): 3189–3194. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.089
6. Waetzig K., Krell A. The effect of Composition on the Optical Properties and Hardness of Transparent Al-Rich MgO·nAl₂O₃ Spinel Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society.* 2016; 99 (3): 946–953.
7. Khomidov F.G., Kadyrova Z.R., Usmanov K.L., et al. Peculiarities of Sol-Gel Synthesis of Aluminum-Magnesium Spinel. *Glass and Ceramics.* 2021; 78: 251–254.
8. Nećina V., Pabst W. Comparison of the Effect of Different Alkali Halides on the Preparation of Transparent MgAl₂O₄ Spinel Ceramics via Spark Plasma Sintering (SPS). *Journal of the European Ceramic Society.* 2020; 40 (15): 6043–6052.
9. Pappas J.M., Thakur A.R., Kinzel E.C., Dong X. Direct 3D Printing of Transparent Magnesium Aluminate Spinel Ceramics. *Journal of Laser Applications.* 2020; 33 (1): 012018.
10. Abzaev Yu.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., et al. Investigation of the Melting of Quartz Sand by Low-Temperature Plasma. *Glass and Ceramics.* 2015; 72 (5–6): 225–227.
11. Shekhovtsov V.V., Abzaev Yu.A., Volokitin O.G., et al. Structure and Phase Composition of Natural Magnesite in 1173–6500 K Temperature Range. *Russian Physics Journal.* 2022; 65 (7): 1142–1148.
12. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Gafarov R.E. Synthesis of mullite-containing ceramics in a low-temperature plasma medium. *Glass Physics and Chemistry.* 2022; 48 (5): 630–634.
13. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Ulmasov A.B. Synthesis of Aluminum-Magnesian Ceramics MgAl₂O₃ in Thermal Plasma Environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2022; 24 (3): 138–146. (In Russian)
14. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Ushkov V.A., Zorin D.A. MgO-SiO₂ Glass Ceramics Synthesis by Plasma Melting. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki.* 2022; 48 (24) 15–18. DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54017.19278 (In Russian)
15. Plawsky J. Flow Visualization Glass-Ceramic: Preliminary Experimental and Modelling Results. *Journal of Materials Science.* 1992; (27): 2501–2514. DOI: 10.1007/BF01105063
16. Shannon R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides. *Acta Crystallographica A.* 1976; 32 (5): 751–767. DOI: 10.1107/S0567739476001551
17. Dippong T., Levei E.A., Deac I.G., Lazar M.D., Cadar O. Influence of SiO₂ Embedding on the Structure, Morphology, Thermal, and Magnetic Properties of Co_{0.4}Zn_{0.4}Ni_{0.2}Fe₂O₄ Particles. *Nanomaterials.* 2023; (13): 527. DOI: 10.3390/nano13030527

Сведения об авторах

Шеховцов Валентин Валерьевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Семеновых Марк Андреевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, markik90@gmail.com

Улмасов Ахрорбек Боходиржон, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, i@aulmasov.ru

Дятчина Дарья Сергеевна, студентка, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, dyatchina06@bk.ru

Анисимова Екатерина Алексеевна, студентка, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, donisimo200620062006@gmail.com

Authors Details

Valentin V. Shekhovtsov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

Mark A. Semenovykh, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, markik90@gmail.com

Akhrorbek B. Ulmasov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Sol-yanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, i@aulmasov.ru

Darya S. Dyatchina, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, dyatchina06@bk.ru

Yekaterina A. Anisimova, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, donisimo200620062006@gmail.com

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 09.10.2025
Одобрена после рецензирования 21.10.2025
Принята к публикации 10.11.2025

Submitted for publication 09.10.2025
Approved after review 21.10.2025
Accepted for publication 10.11.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 187–196.

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 (6): 187–196.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-187-196

EDN: RUTEPA

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСНО-ГИПСОВОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДОБАВЛЕНИИ В ЕГО СОСТАВ ЦЕМЕНТА

**Тимофей Иванович Горохов, Александр Владимирович Ерофеев,
Никита Святославович Ковалев**

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Аннотация. Актуальность. Использование цемента при производстве древесно-гипсового композитного материала в качестве модифицирующей добавки приводит к повышению его прочностных характеристик. Это определяет необходимость исследования процесса структурообразования древесно-гипсового материала с добавлением цемента с позиции научного обоснования повышения прочностных характеристик.

Целью настоящего исследования является определение методом ртутной порометрии диаметра пор и их количественного распределения в структуре материала для образцов древесно-гипсового композитного материала с добавлением цемента и без его использования.

Методология. Исследование проводилось методом ртутной порометрии, основанным на измерении давления для вдавливания несмачивающей ртутью жидкости в поры образца.

Результаты исследования позволили оценить изменение структуры древесно-гипсового композитного материала при введении цемента.

Ключевые слова: гипс, древесно-гипсовый композит, отделочный материал, ртутная порометрия, структурообразование, цемент

Финансирование: в работе применялось оборудование ЦКП НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Для цитирования: Горохов Т.И., Ерофеев А.В., Ковалев Н.С. Анализ изменения структуры древесно-гипсового композитного материала при добавлении в его состав цемента // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 187–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-187-196. EDN: RUTEPA

ORIGINAL ARTICLE

ANALYSIS OF CEMENT-MODIFIED STRUCTURE OF WOOD-GYPSUM COMPOSITE

Timofey I. Gorokhov, Aleksandr V. Yerofeyev, Nikita S. Kovalev
Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. The cement use in the production of wood-gypsum composites to modify their structure leads to an increase in its strength properties. It is therefore necessary to study the

structure modification of wood-gypsum composites by the addition of cement in terms of the scientific justification of improving strength properties. The composite structure with and without the cement addition is studied using mercury injection.

Purpose: The aim of this work is to determine the pore size and their quantitative distribution in the material structure using mercury injection in wood-gypsum composite samples with and without the cement addition.

Methodology: Mercury injection is based on measuring the pressure of non-wetting mercury liquid in the porous structure.

Research findings: The obtained results evaluate the wood-gypsum composite structure modified by the cement addition.

Keywords: gypsum, wood-gypsum composite, finishing material, mercury injection, structure formation, cement

Funding: The research was carried out using the equipment of the Center for Sharing Use “Nanomaterials and Nanotechnologies” of Tomsk Polytechnic University supported by the RF Ministry of Education and Science project No. 075-15-2021-710.

For citation: Gorokhov T.I., Erofeev A.V., Kovalev N.S. Analysis of Cement-Modified Structure of Wood-Gypsum Composite. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 187–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-187-196. EDN: RUTEPA

Введение

Одним из способов повышения эксплуатационных характеристик разработанного древесно-гипсового композитного материала [1] является применение различных модифицирующих добавок. Так, введение цемента в состав древесно-гипсового композитного материала на стадии производства позволяет повысить его механические характеристики [2]. Исследования показали, что замещение до 16,5 % гипсового вяжущего в составе древесно-гипсового композитного материала на цемент позволяет повысить прочность на растяжение при изгибе более чем в 5 раз и прочность на сжатие более чем в 3 раза. Дальнейшее замещение гипса цементом приводит к обратному результату: наблюдается снижение прочностных показателей [Там же].

Зависимости изменения прочностных характеристик древесно-гипсового композитного материала от процентного содержания цемента, строго говоря, подчиняется нормальному распределению с экстремумом, соответствующим процентному содержанию цемента 16,5 %. Объяснение такой зависимости изменения прочностных характеристик композитного материала лежит в области структурообразования. При затворении смеси гипса с цементом водой, т. е. в начале процесса гидратации, алюминатные составляющие цементного клинкера вступают в реакцию с полуводным гипсом, результатом которой является образование этtringита. Этtringит представляет собой высокосульфатную форму гидросульфоалюмината кальция [3, 4]. Он имеет кристаллическую структуру, состоящую из колонок, связанных между собой водородной связью, $[Ca_3 \cdot Al(OH)_6]^{3+}$. Промежутки заполнены ионами сульфата и молекулами воды [5]. Элементарная ячейка этtringита представлена на рис. 1.

Образование этtringита влечет за собой увеличение твердой фазы, что в свою очередь приводит к увеличению объема гипсового камня. Однако до

настоящего времени исследователи так и не пришли к общему мнению, объясняющему процессы, протекающие внутри материала, связанные с его увеличением. П.П. Будников, И.В. Кравченко и ряд других исследователей дают объяснения на основе предложенной ими теории расширения, согласно которой расширение обусловлено силами кристаллизационного давления, которые возникают по мере роста кристаллов этtringита [7]. Ряд других исследователей, например В.В. Михайлов, считают, что роль кристаллизационного давления не является решающей в процессе расширения, а процесс обусловлен переходом моносульфатной формы в трехсульфатную [8, 9].

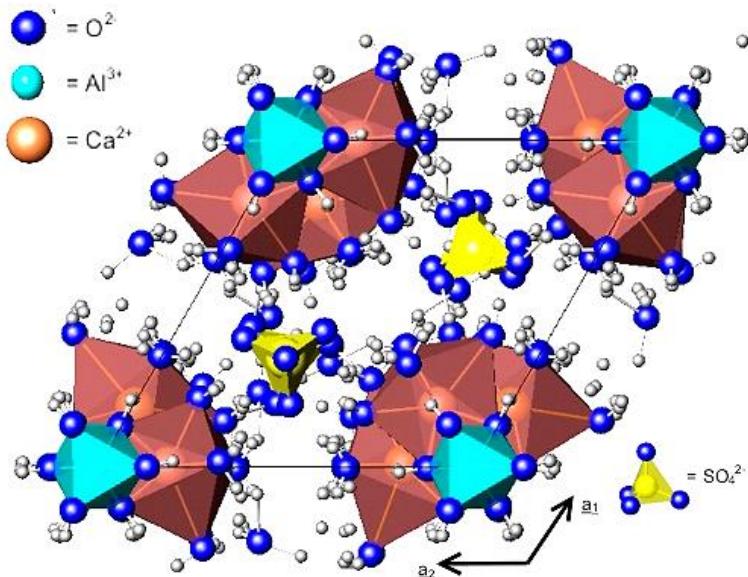


Рис. 1. Элементарная ячейка этtringита [6]
Fig. 1. The ettringite unit cell [6]

Увеличение объема роста кристаллов этtringита игольчатой или нитевидной формы (рис. 2), вне зависимости от причин и механизма их образования и роста, на начальном этапе должно приводить к заполнению порового пространства твердеющей системы, что в свою очередь должно повышать плотность материала и вести к повышению прочностных характеристик. Также стоит отметить, что кристаллы этtringита, упорядочивая структуру, выполняют роль армирующих материалов.

С учетом того, что в системе «гипсовое вяжущее – древесные опилки» в контактной зоне при твердении гипса отсутствуют химические реакции между вяжущим и наполнителем в виде древесных опилок, выступающих в качестве инертного наполнителя, древесные опилки не участвуют в химическом процессе структурообразования древесно-гипсового композитного материала. Инертный наполнитель (древесные опилки) в гипсовой матрице связывается за счет механической адгезии. Однако с учетом такого свойства древесины, как сжимаемость, рост кристаллов этtringита позволяет изменить ячеистую струк-

туру древесины путем сжатия, при этом количество пор в структуре древесины уменьшается, следовательно, растут механические характеристики.

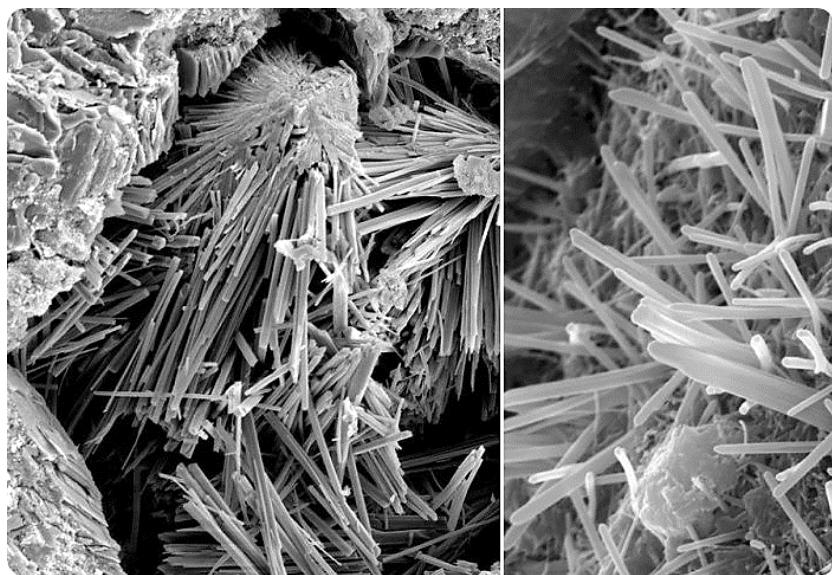


Рис. 2. Кристаллы этtringита
Fig. 2. Ettringite crystals

Для подтверждения вышеизложенного необходимо изучить структуру древесно-гипсового композитного материала с добавлением цемента и без него, а также провести сравнительный анализ полученных результатов.

Методы и принципы исследования

Исследования проводились на ртутном поромере Poremaster 33 (производитель Anton Paar, быв. Quantachrome) по методике «ISO 15901-1:2005 Распределение пор по размерам и определение пористости твердых материалов методами ртутной порометрии и адсорбции газа. Часть 1. Ртутная порометрия».

Метод ртутной порометрии относится к экспериментальным методам исследования структуры материала. Он применяется для измерения пористости и распределения пор по размерам. Метод основан на способности ртути под воздействием приложенного давления проникать в поры материала. В связи с тем, что ртуть, имея большой краевой угол смачивания, не смачивает большинство твердых поверхностей, она не заполняет поры материала без приложения внешнего давления. При этом чем меньше диаметр пор, тем большее давление требуется для проникновения ртути [10].

Исследование порометрии проводилось при температуре 20 °C, угол наклона ртути составлял 140° при значении ее поверхностного натяжения 480 эрг/см². В результате были определены следующие характеристики: минимальный и максимальный диаметры пор; средний, модальный и медианный диаметры пор; удельная площадь поверхности пор; общая пористость, межчастичная и внутричастичная пористость.

Основные результаты

График интегральной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композитного материала без добавки представлен на рис. 3, *а*, а график аналогичной зависимости для древесно-гипсового композитного материала с замещением гипсового вяжущего цементом (16,5 % от общей массы вяжущего) – на рис. 3, *б*.

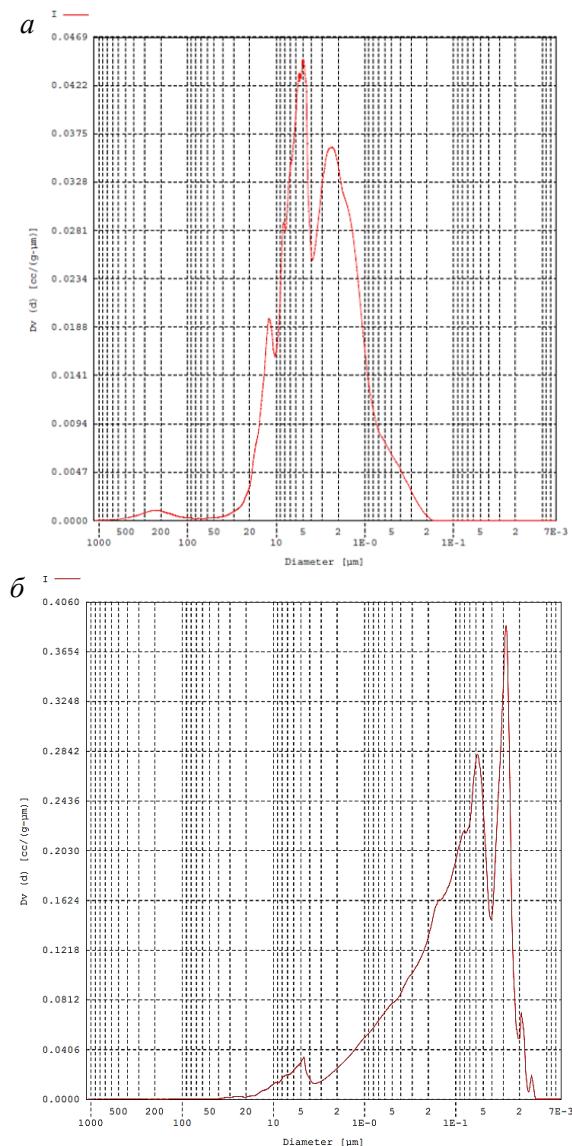


Рис. 3. Графики интегральной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композита без добавки (*а*) и для древесно-гипсового композита с добавкой цемента (*б*)

Fig. 3. Integral dependences between the pore volume and size for wood-gypsum composite without (*a*) and with (*b*) cement addition

График дифференциальной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композитного материала без добавки представлен на рис. 4, *а*, а график аналогичной зависимости для древесно-гипсового композитного материала с замещением гипсового вяжущего цементом (16,5 % от общей массы вяжущего) – на рис. 4, *б*.

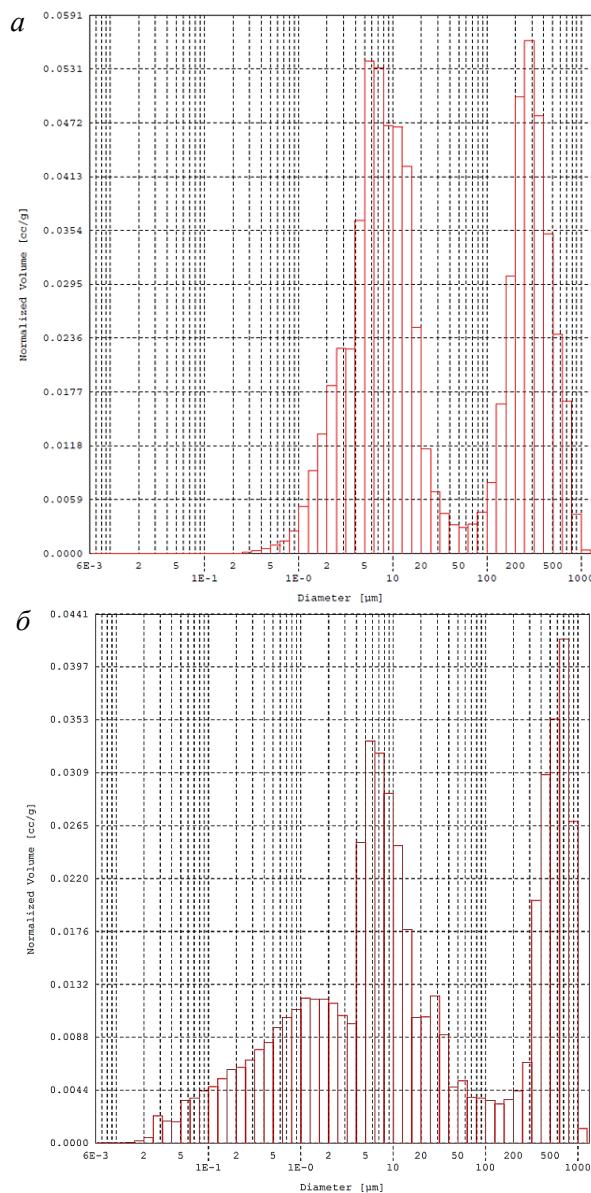


Рис. 4. Графики дифференциальной зависимости объема пор от их размеров для древесно-гипсового композита без добавки) (*а*) и для древесно-гипсового композита с добавкой цемента (*б*)

Fig. 4. Differential dependences between the pore volume and size for wood-gypsum composite without (*a*) and with (*b*) cement addition

Численные значения порометрического анализа даны в таблице.

Основные параметры образцов
Main parameters of wood-gypsum composites

Параметр	Исходный образец	Образец с добавлением цемента
Основные параметры образцов		
Масса образца, г	0,5316	1,0009
Объем образца, см ³	1,0000	1,0000
Температура измерений, °C	20	20
Диаметры пор		
Максимальный диаметр пор, мкм	1077,8	1073,0
Минимальный диаметр пор, мкм	0,00710	0,0074
Средний диаметр, мкм·10 ⁻¹	~ 8,045	~ 2,5
Модальный диаметр, мкм	~ 4,89	~ 1,3
Медианный диаметр, мкм	~ 14,58	–
Объемная пористость		
Общий объем введенной ртути, см ³ /г	0,7264	0,5264
Общая пористость, %	~ 38,62	~ 52,64
Межчастичная пористость, %	~ 33,22	~ 46,22
Внутричастичная пористость, %	~ 5,39	~ 8,85
Удельная площадь поверхности, м ² /г	0,3612	2,7

На основании экспериментальных данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод о том, что частичное замещение 16,5 % гипсового вяжущего цементом в составе древесно-гипсового композитного материала приводит к изменению структуры материала, а именно наблюдается формирование более мелкопористой структуры. В количественных показателях это выражается в снижении среднего диаметра пор более чем в 3 раза, а модального – почти в 4 раза. При этом увеличивается общая пористость материала с 38,62 до 52,64 %. Также стоит отметить, что для древесно-гипсового композитного материала без добавки основной вклад в пористость вносят поры диаметра от 7 до 15 мкм, в отличие от композитного материала с добавкой, для которого основной диапазон размера пор составляет от 0,5 до 10 мкм. Кроме того, увеличение удельной площади поверхности почти в 7,5 раза также подтверждает вывод о том, что количество пор значительно увеличилось, а их размер уменьшился. Основным объяснением особенности изменения структуры древесно-гипсового композитного материала является выдвинутое предположение о заполнении межчастичного пространства

древесно-гипсовой структуры кристаллами этtringита. В результате формируется материал с более высоким количеством замкнутых пор меньшего размера, имеющих окружную форму, стремящуюся к сферической, что обуславливает уменьшение количества дефектов структуры материала путем формирования более плотной и однородной структуры, что, в свою очередь, также сказывается на росте механических характеристик.

Заключение

Частичное замещение гипсового вяжущего цементом в составе древесно-гипсового композитного материала способствует образованию и росту кристаллов этtringита. На начальном этапе новообразованные кристаллы заполняют поровое пространство композитного материала, сжимая древесные опилки, тем самым улучшая механические характеристики и выступая в качестве армирующих элементов. Все это на уровне образования структуры древесно-гипсового композитного материала позволяет повысить его прочностные характеристики. Однако при полном заполнении порового пространства и максимальном сжатии древесных опилок наступает стадия невозможности увеличения твердой фазы. В результате дальнейший рост кристаллов этtringита приводит к образованию дополнительных внутренних напряжений, что снижает прочностные характеристики материала.

Таким образом, для повышения прочностных характеристик древесно-гипсового композитного материала возможно использование цемента в качестве добавки. Однако количество цемента должно соответствовать требуемому объему образования и роста кристаллов этtringита для заполнения порового пространства и максимального сжатия древесных опилок. Результаты исследования показали, что оптимальным содержанием цемента для изготовления древесно-гипсового композитного материала с повышенными прочностными характеристиками является 16,5 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2788603 С1 Российской Федерацией, МПК C04B 28/14, C04B 18/26. Древесно-гипсовый композит : № 2022108904 : заявл. 04.04.2022 : опубл. 23.01.2023 / Ерофеев А.В., Горохов Т.И., Ковалев Н.С., Горохов С.И. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». EDN: BPWIRU
2. Ковалев Н.С., Горохов Т.И., Ерофеев А.В. О результатах использования цемента в качестве добавки для повышения прочностных характеристик при производстве древесно-гипсового композитного материала // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию Института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, 13–14 июня 2024 г. Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2024. С. 271–274. EDN: ZOILZP
3. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня. Москва : НИУ МГСУ, 2016. Электрон. дан. и прогр. (14 Мб). (Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ). URL: <http://www.iprbookshop.ru>
4. Мирюк О.А. Учебное пособие по дисциплине «Вяжущие вещества». Магнитогорск : МГТУ, 2006. 163 с. ISBN 5-89514-698-8.
5. Еленова А.А. Разработка комплексной добавки для ускоренного твердения цементного камня : специальность 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических

- материалов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Еленова Аурика Алмазовна. Москва, 2017. 22 с. EDN: RYJDOC
6. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Влияние гидродинамически активированной добавки кристаллогидрата на гидратацию и твердение цементного камня // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 7 (176). С. 36–38. EDN: XEBKXX
 7. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. Москва : Стройиздат, 1951. 372 с.
 8. Самченко С.В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов. Москва : Федеральное агентство по образованию, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2005. 154 с. ISBN 5-7237-0514-0. EDN: QNDVZV
 9. Самченко С.В. Структурообразование при твердении сульфатированных цементов : специальность 05.17.11 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2005.
 10. Методические указания по порометрии капиллярно-пористых строительных материалов / разраб. В.М. Казанский [и др.] ; Гос. НИИ строит. материалов и изделий. Киев : [Б. и.], 1983. 71 с.

REFERENCES

1. Yerofeev A.V., Gorokhov T.I., Kovalev N.S., Gorokhov S.I. "Wood-gypsum composite". Patent Russ. Fed. No. 2788603. 2023. EDN: BPWIRU (In Russian)
2. Kovalev N.S., Gorokhov T.I., Erofeev A.V. Cement as an additive to wood-plaster composition for its strength improvement. In: Proc. 10th Int. Sci. Conf. 'Stable Development of the Region: Architecture, Construction, Transport'. June 13–14. Tambov: Tambov State Technical University, 2024. Pp. 271–274. EDN: ZOILZP (In Russian)
3. Samchenko S.V. Formation and genesis of cement stone structure. Moscow, 2016. Available: www.iprbookshop.ru (In Russian)
4. Miryuk O.A. Binding Materials. Magnitogorsk, 2006. 163 p. ISBN 5-89514-698-8. (In Russian)
5. Elenova A.A. 'Development of a complex additive for accelerated hardening of cement stone'. PhD Abstract. Moscow, 2017. 22 p. EDN: RYJDOC (In Russian)
6. Elenova A.A., Krivoborodov Yu.R. The Effect of a Hydrodynamically Activated Crystallohydrate Additive on Cement Hydration and Hardening. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2016; 30 (7); 36–38. (In Russian)
7. Budiikov P.P. Gypsum Research and Application. Moscow: Stroyizdat, 1951. 372 p. (In Russian)
8. Samchenko S.V. Ettringite Role in the Formation and Genesis of Structure of Special Hydrated Cement. Moscow, 2005. 154 p. (In Russian)
9. Samchenko S.V. "Structure formation during hardening of sulfated cements". DSc Thesis. Moscow, 2005. (In Russian)
10. Kazansky V.M., et al. (Eds.) Methodological Guidelines for Mercury Injection of Capillary-Porous Building Materials. Kiev, 1983. 71 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Горохов Тимофей Иванович, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392000, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Д, gorohowt@yandex.ru

Ерофеев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392000, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Д, AV.Erofeev@yandex.ru

Ковалев Никита Святославович, студент, Тамбовский государственный технический университет, 392000, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Д, kov.nik.01@mail.ru

Authors Details

Timofey I. Gorokhov, Research Assistant, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, gorohowt@yandex.ru

Aleksandr V. Yerofeyev, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, AV.Erofeev@yandex.ru

Nikita S. Kovalev, Student, Research Assistant, Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia, kov.nik.01@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 27.01.2025
Одобрена после рецензирования 10.10.2025
Принята к публикации 13.10.2025

Submitted for publication 27.01.2025
Approved after review 10.10.2025
Accepted for publication 13.10.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 197–211.

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 (6): 197–211.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.276

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-197-211

EDN: MIGBLX

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНОЙ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВОЛОКОН ХРИЗОТИЛА

Людмила Николаевна Наумова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Аннотация. Актуальность исследования заключается в возможности использования модифицированных волокон хризотила в качестве наполнителя эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции для улучшения физико-химических свойств состава и получения термоотверждаемого полимерного покрытия с улучшенными свойствами.

Цель настоящей работы – исследование химического состава исходной и наполненной модифицированными волокнами хризотила порошковой композиции и оценка физико-химических свойств полимерных покрытий.

Результаты. Установлено изменение химического состава исходной порошковой композиции при введении модифицированных волокон хризотила. Показано повышение соле- и кислотостойкости полученных полимерных покрытий. Установлено снижение пористости покрытий, наполненных волокнами, по сравнению с ненаполненными. Представлена термостойкость полученных полимерных покрытий на модифицированных волокнистых наполнителях при температуре 190 и 550 °С, отличающихся повышенной величиной.

Ключевые слова: порошковая композиция, эпоксидно-полиэфирное связующее, термоотверждаемое покрытие, модифицированные волокна, хризотил, коррозионная устойчивость, пористость, адгезия, термостойкость

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Наумова Л.Н. Изменение химического состава эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции на основе модифицированных волокон хризотила // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 197–211. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-197-211. EDN: MIGBLX

ORIGINAL ARTICLE

CHEMICAL COMPOSITION OF EPOXY-POLYESTER POWDERS BASED ON MODIFIED CHRYSOTILE FIBER

Lyudmila N. Naumova

Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod, Russia

Abstract. Modified chrysotile fiber can be used as a filler in the epoxy-polyester powder composition to improve its physicochemical properties and obtain a thermosettable polymer coating with improved properties.

Purpose: The aim of this work is to study the chemical composition of the initial and fiber-modified chrysotile powder composition and evaluate physicochemical properties of polymer coatings.

Research findings: It is shown that the chemical composition of the initial powder composition changes after the addition of modified chrysotile fiber. The salt and acid resistance of the obtained polymer coatings increases. The porosity of coatings filled with fibers decreases in comparison with unfilled ones. The heat resistance of the obtained polymer coating with the addition of modified fibrous fillers grows at heating at 190 and 550 °C.

Keywords: powder composition, epoxy-polyester powder, thermosettable coating, modified fiber, chrysotile, corrosion resistance, porosity, adhesion, heat resistance

Acknowledgment: the authors like to express their gratitude towards the management of the High Technology Center of the Belgorod State Technological University for equipment employed in these studies.

For citation: Naumova L.N. Chemical Composition of Epoxy-Polyester Powders Based on Modified Chrysotile Fiber. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 197–211. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-197-211. EDN: MIGBLX

Введение

В настоящее время вопросы, связанные с улучшением эксплуатационных характеристик полимерных порошковых покрытий, их рецептур продолжают оставаться актуальными и вызывают интерес [1, 2]. Формирование состава наполненных композиций направлено также на подбор полимерных связующих, пластификаторов, стабилизаторов, пигментов, катализаторов, наполнителей, различных добавок, улучшающих качество расплава по поверхности окрашиваемого материала.

Преимущества полимерных порошковых покрытий связаны с точки зрения технологичности процесса, экономической составляющей, экологических подходов. Использование существующих технологий нанесения порошка позволяет получать покрытия с необходимыми физико-химическими, декоративными и эксплуатационными свойствами. Сегодня возможно окрашивать силикатные, древесные и другие поверхности и материалы [3, 4].

В качестве порошковых покрытий функционального назначения широко используются порошковые краски на эпоксидной, полиэфирной и гибридных (эпоксидно-полиэфирных) основах [5–7]. В промышленных составах порошковых красок на полиэфирной основе в основном содержатся: смолы, отвердители – 40–60 %; пигменты, наполнители – 30–50 %; различные добавки – 5–10 %. Отвердителями полиэфирных связующих являются амины, ангидриды, заблокированные

ные изоцианаты, эпоксидных – аминные и полиэтиленполиаминные. Эпоксидно-полиэфирные порошковые краски предполагают замену от 50 до 70 % эпоксидной смолы твердыми полиэфирами. Неорганическими пигментами для порошковых красок служат диоксид титана, оксид железа, микронизированный карбонат кальция, сажа и др. Органические пигменты – фталоцианин, бензидин, бензимидазол, хинакрилон. Наполнителями выступают бариты, бланфикс, доломиты, слюда, тальк, в качестве разбавителей – силицид алюминия, литопон, поликарраты, адсорбированные на диоксиде кремния. Порошковые краски являются полидисперсными, размер их частиц составляет 5–350 мкм. Выбор метода нанесения порошковой краски на поверхность изделия зависит от ее дисперсности [8, 9].

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использован состав порошковой окрасочной композиции турецкого производства BPCOAT-PU, Pulver: Micropul. Маркировка упаковки: 02.27 W2 H 7040 – RAL 7040; GRI PUTURLU YARI PARLAK, что соответствовало – гибридная (эпоксидно-полиэфирная), полу-глянцевая, серого цвета, термоотверждаемая.

Механическая обработка хризотиловых волокон, предварительно высушенных, заключалась в их измельчении до размера фракции 50 мкм. Обработку проводили с использованием керамической мельницы в лабораторных условиях. Суммарное время обработки волокон составило 60 мин.

Обработка хризотиловых волокон [10] в дистиллированной воде заключалась в их выдержке в данной среде сроком до 4 дней. pH водных вытяжек хризотила невыветрелых пород составляет 9,5–10,2. Ранее [10] экспериментальным путем было установлено, что значение электрокинетического потенциала (ζ -потенциал) исходного хризотила в дистиллированной воде (удельная электропроводность воды 4,64 мкСм/см, pH = 6,1, t = 19 °C) составляет +18,8 мВ. Анализ полученного значения ζ -потенциала показал, что исходный хризотил в дистиллированной воде имеет положительный знак заряда поверхности волокон при комнатной температуре, ввиду преимущественной диссоциации ионов OH⁻ и избытка ионов Mg⁺². Кроме этого, вследствие диссоциации ионов OH⁻ отмечается значительное увеличение удельной электропроводности воды (177,6 мкСм/см) при добавлении хризотила для получения суспензии. По окончании выдержки хризотила в водной среде его подвергали распушке путем перемешивания в лабораторной пропеллерной мешалке. Вода, проникая в межволокнистое пространство пучков волокон, способствует их расщеплению на тонкие волокна и увеличивает их сопротивление при изломе в процессе обработки в мешалке. Степень распушки хризотиловых волокон в водной среде составила около 90 %.

Модификация волокон хризотила химическим способом проведено с использованием 5%-го раствора хлорида аммония (NH₄Cl) и с последующей отмыткой до нейтральной среды (pH 6,9–7,1) [10]. Выбор концентрации раствора и используемого электролита опирался на предварительный экспериментальный подход и сравнительный анализ полученных ранее [11, 12] результатов работы по модификации волокон хризотила под воздействием различных модифицирующих факторов. Обработка исходных волокон хризотила 5%-м водным раствором хлористого аммония (слабого электролита) способствует пе-

резарядке поверхности волокон и увеличению абсолютной величины отрицательного заряда поверхности, что объясняется выщелачиванием магния из поверхностного слоя волокон хризотила.

Модифицированные волокна хризотила вводили в состав эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции для повышения антакоррозионной и термической стойкости покрытия.

Количество модифицированных волокон хризотила, вводимых в состав порошка, составляло 30 % от его массы. Данное количество наполнителя соответствовало равномерному распределению частиц хризотила в порошковой композиции и было предварительно опробировано в составе смеси при получении покрытия. Порошковую краску наносили на металлические пластины из стали Ст3. Размер пластин составлял 50×100 мм. Покрытие наносилось электростатическим распылением в распылительной камере, полимеризация и отверждение происходили при обжиге в печи в заводских условиях. Температура полимеризации покрытия – 180 °С, время полимеризации – 15 мин.

Электронно-микроскопические исследования полученных полимерных покрытий без наполнителя и наполненных модифицированными волокнами хризотила проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения марки TESCAN MIRA 3 LMU. Методом энергодисперсионного анализа был определен элементный химический состав порошковых композиций.

Идентификацию компонентного состава исходной эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции и наполненной, а также модифицированных волокон хризотила анализировали с использованием метода инфракрасной спектрофотометрии [13–15]. Спектры поглощения исследуемых образцов были получены с помощью ИК-Фурье в спектрометре VERTEX 70 в области 4000–500 cm^{-1} фирмы-изготовителя Bruker Optik GmbH (Германия).

Определение стойкости полученных полимерных покрытий к действию агрессивных сред проводили по ГОСТ 9.302–88 и ГОСТ 9.403–80 методом погружения пластин в растворы: 25 % HCl, 5 % NaCl, 20 % CuSO₄. Сущность метода состояла в погружении образцов в испытуемый раствор и выдержке в нем в течение необходимого времени. При определении коррозионной устойчивости покрытий в кислом и солевом растворах образцы выдерживали в течение 24 ч. В каждом коррозионном испытании использовали по 3 образца, один из которых был выбран в качестве контрольного. Перед испытанием производили взвешивание образцов на аналитических весах с точностью до 4-го знака после запятой.

Изменение массы образцов после каждого периода испытания в коррозионной среде (ΔM) вычисляли по формуле

$$\Delta M = M_1 - M, \quad (1)$$

где M – масса испытуемого образца до первого погружения его в химический реагент, г; M_1 – масса испытуемого образца после выдержки его в химическом реагенте, г.

Определение пористости покрытий проводили в соответствии с ГОСТ 9.302–88. Метод основан на взаимодействии исследуемой поверхности со средой реагента и образованием окрашенных соединений в местах пор. При проведении контроля выбран метод погружения образцов в раствор, ука-

занный в стандартной методике: калий железосинеродистый – 3 г/дм³; натрий хлористый – 10 г/дм³. Исследование проводили при температуре 22 °С и выдержке стандартных образцов (100×150 мм) в растворе в течение 5 мин. По прошествии времени с помощью электронного микроскопа подсчитывали число синих точек, соответствующих числу пор.

Среднее число пор (N_{cp}) вычисляли по формуле

$$N_{cp} = \frac{N_{общ}}{S}, \quad (2)$$

где N_{cp} – общее число пор на контролируемой поверхности; S – площадь контролируемой поверхности, см².

Адгезионные свойства покрытий оценивали в соответствии с ГОСТ 9.302–88. Метод контроля адгезионных свойств покрытия заключался в нагреве образцов в сушильном шкафу до температуры 190 °С в течение 1 ч. По прошествии времени образцы охлаждали на воздухе. Перед испытанием производили взвешивание образцов на аналитических весах с точностью до 4-го знака после запятой.

Изменение (ΔM) массы образцов после испытания на адгезионную прочность после их выдержки при 190 и 550 °С вычисляли по формуле

$$\Delta M = M_0 - M_1, \quad (3)$$

где M_0 – масса испытуемого образца до его нагрева, г; M_1 – масса испытуемого образца после выдержки его при указанной температуре, г.

Оценку воспламеняемости покрытий проводили в соответствии с ISO 4589 (ASTM D 2863). В зависимости от фактора окружающей среды исследуемые образцы подвергают испытаниям при температурах: 550, 650, 750, 850 и 960 °С. Соответствующая температура испытания выбирается с учетом риска недопустимого нагрева изделий, их воспламенения и распространения пламени. На основании данного факта была выбрана минимальная температура для испытания. Испытанию подвергались образцы стандартных размеров 100×150 мм. Перед испытанием производили взвешивание образцов на аналитических весах с точностью до 4-го знака после запятой. Выдержку образцов проводили в муфельной печи при температуре 550 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением в ней до полного остывания в течение 24 ч.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных спектров поглощения модифицированных волокон хризотила (рис. 1) свидетельствует об увеличении интенсивности пиков, характерных для волокон, обработанных хлоридом аммония и измельченных, по сравнению с обработанными водой. Данный факт позволяет заключить, что слабокислая среда раствора хлорида аммония и механическая обработка волокон хризотила способствуют изменению состояния их поверхности за счет формирования реакционноактивных центров. В водной среде происходит увеличение удельной поверхности хризотила за счет распушивающего эффекта волокон.

В табл. 1 представлены полученные значения спектров поглощения модифицированных волокон хризотила и характерные для них колебания типов связи.

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет заключить, что при механической обработке волокон появляются полосы спектров поглощения

в области 1024 и 748 см^{-1} , связанные с валентными колебаниями связи Si–O. Для волокон, модифицированных водной средой, данный тип колебания связи появляется в области спектра 631 см^{-1} ; для волокон механомеханической и кислотной обработок аналогичный тип связи смещается в область спектра 617 см^{-1} . Валентные колебания OH-групп в области 3775, 3688, 3638 и 3427 см^{-1} свидетельствуют об их увеличении за счет обнажения бруцитового слоя при активации поверхности волокон хризотила, по сравнению с обработанными водой волокнами. Механическая и кислотная обработка волокон способствуют деформационным колебаниям данного вида связей в области 2945 см^{-1} , которые отсутствуют у волокон, выдержаных в водной среде.

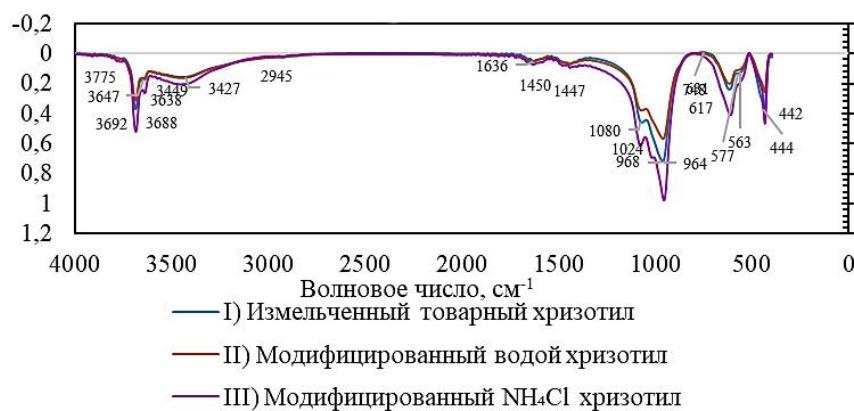


Рис. 1. ИК-спектры модифицированных волокон хризотила
Fig. 1. IR spectra of modified chrysotile fiber

Таблица 1

**Характеристические частоты и функциональные группы
модифицированных волокон хризотила**

Table 1

Characteristic frequencies and functional groups of modified chrysotile fiber

ИК-спектры поглощения, см^{-1}			Связь	Тип колебаний		
Способ обработки						
Механический	Химический					
Измельчение	H_2O	NH_4Cl				
3775	–	3775	OH^-	Валентные		
3688	3692	3688	OH^-	Валентные		
3638	3647	–	OH^-	Валентные		
3427	3449	3427	OH^-	Валентные		
2945	–	2945	OH^-	Деформационные		
1636	1636	1636	OH^-	Деформационные		
1450	1447	1450	OH^-	Деформационные		
1080	1080	1080	Si–O	Валентные		
1024	–	–	Si–O	Валентные		
964	968	964	Si–O	Асимметричные		

Окончание табл. 1
End of table 1

ИК-спектры поглощения, см^{-1}			Связь	Тип колебаний		
Способ обработки		Связь				
Механический	Химический					
Измельчение	H_2O	NH_4Cl				
748	—	—	$\text{Si}-\text{O}(\text{SiO}_4^{2-})_{\text{тетр}}$	Тетраэдralные		
—	631	—	$\text{Si}-\text{O}$	Тетраэдralные		
617	—	617	$\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$	Тетраэдralные		
563	577	563	$\text{Si}-\text{O}-\text{Mg}^{2+}$	Тетраэдralные		
442	444	442	$(\text{SiO}_4^{2-})_{\text{тетр}}$, отчасти $\text{Si}-\text{O}-\text{Mg}^{2+}$	Деформационные		

Сравнительный анализ полученных кривых спектров поглощения (рис. 2) эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции без волокнистого наполнителя и с модифицированными волокнами хризотила свидетельствует об увеличении интенсивности пиков и появлении дополнительных спектров поглощения в пользу присутствующих в составе смеси волокон.

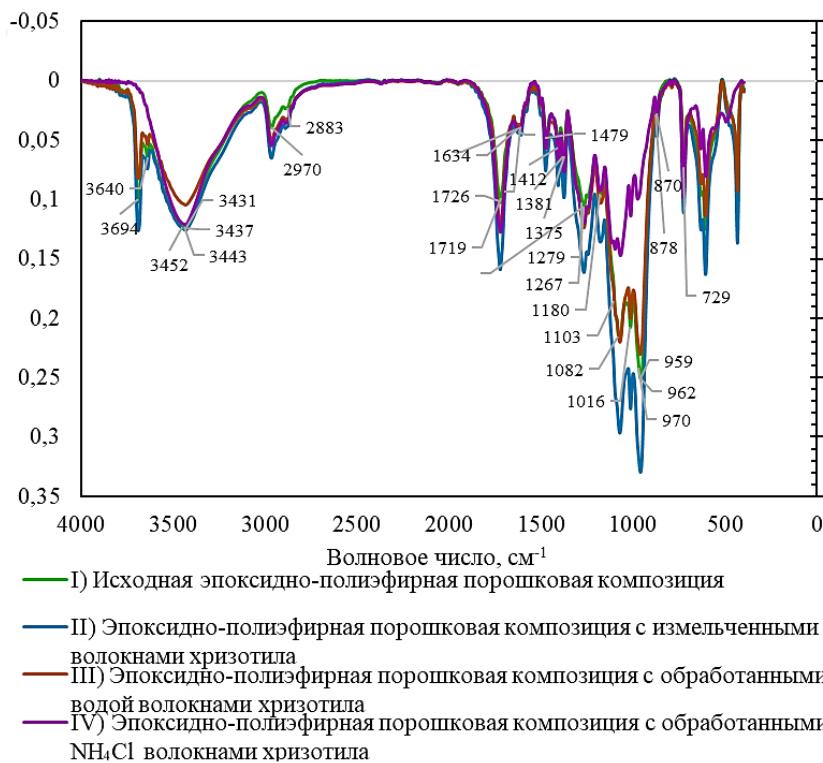


Рис. 2. ИК-спектры эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции без наполнителя и с наполнителем – модифицированными волокнами хризотила

Fig. 2. IR spectra of epoxy-polyester powder composition with and without the addition of modified chrysotile fiber

При введении модифицированных волокон хризотила в эпоксидно-полиэфирную порошковую композицию (рис. 2, табл. 2) происходит изменение интенсивности и некоторое смещение полос спектров поглощения. Наиболее показательно в области: 1730–1300; 1280–1000; 970–500 см^{-1} , по сравнению с исходной – ненаполненной. Интенсивность пиков свидетельствует о степени полимеризации полимера при введении волокон хризотила в порошковую композицию.

Таблица 2
Характеристические частоты и функциональные группы исходной и наполненной эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции

Table 2
Characteristic frequencies and functional groups of the epoxy-polyester powder composition with and without the addition of modified chrysotile fiber

ИК-спектры поглощения, см^{-1}				Связь	Примечание		
Наполнение композиции волокнами хризотила							
Исходная, без наполнителя	Измельченными	Модифицированными водой	Модифицированными NH_4Cl				
–	3692	3692	3694	ОН	Валентные колебания ОН-групп хризотила		
–	3638	3640	–	ОН	Валентные колебания ОН-групп хризотила		
3452	3443	3437	3431	ОН	Валентные колебания ОН-групп хризотила		
2970	2976	2972	2974	C–H (–CH ₂)	Асимметричные связи		
2883	2889	2878	2889	C–H (–CH ₂)	Асимметричные связи		
1719	1726	1726	1726	C=O	Карбонильная сложноэфирная		
1634	1616	1611	1628	C=O	Валентные колебания эфирной связи		
1479	1479	1477	1475	CH ₂	Ножничные колебания		
1412	–	1412	–	C–H (–CH ₂) (–CH ₃)	Деформационные колебания		
1375	1375	–	1381	C–H (–CH ₃)	Деформационные колебания		
1271	1267	1273	1279	C–O–C	Деформационные колебания эфирной связи		
1180	1186	1182	1177	C–O–C	Колебания сложноэфирной группы		
1103	–	–	–	C–O; C–C; C–O–C; C–H	Колебания эпоксидных, эфирных, ароматических групп		

Окончание табл. 2
End of table 2

ИК-спектры поглощения, см^{-1}				Связь	Примечание		
Наполнение композиции волокнами хризотила							
Исходная, без наполнителя	Измельченными	Модифицированными водой	Модифицированными NH_4Cl				
—	1080	1078	1082	Si—O	Валентная переменная связи Si—O		
1016	1016	1018	1018	Si—O	Валентная переменная связи Si—O		
970	—	—	—	C—H; C=C	Асимметричные колебания		
—	959	962	968	Si—O	Колебания Si—O в тетраэдрических группах SiOH		
870	870	878	—	Si—O; C—H	Колебания связей Si—O, ароматического кольца		
729	729	729	729	C—H (—CH ₂)	Деформационные колебания		
636	636	636	636	Si—O—Mg Me—O	Деформационные колебания связей Si—O—Mg; Me—O		
609	609	608	611	Me—O	Колебания металлов в октаэдрических позициях		
500	—	—	—	Me—O	Колебания металлов в октаэдрических позициях		
—	486	478	—	Si—O—Me	Колебания силикатных тетраэдров		
—	434	436	434	Si—O—Me	Колебания силикатных тетраэдров		

Валентные колебания вдоль связи Si—O в тетраэдрических группах SiOH в области 1016–1080, 959–878 см^{-1} говорят о влиянии полимера на поверхность модифицированных волокон хризотила, что подтверждается увеличением интенсивности пиков. При введении в композит измельченных и обработанных хлоридом аммония волокон исчезают деформационные колебания связей C—H в группах —CH₂ и —CH₃ (табл. 2) в области 1412 см^{-1} . Данный факт можно объяснить изменением угла связи между атомами и колебаниями связей при близких частотах. Колебания связей в области 1103 и 970 см^{-1} , характерные для колебаний эпоксидных, эфирных, ароматических групп исходной полимерной

композиции при введении волокнистых частиц, не проявляются при введении модифицированных волокон хризотила, что может говорить о колебании энергетически равноценных групп атомов. Также можно заключить, что полоса в области 970 см^{-1} может сместиться в область полос $959, 962, 968\text{ см}^{-1}$ ввиду появления колебаний связи Si—O в тетраэдрических группах SiOH.

В области полосы 500 см^{-1} спектра колебаний связи Me—O исходной полимерной композиции происходит ее смещение в область полос $486, 478, 436, 434\text{ см}^{-1}$ с образованием связей Si—O—Me, что также может свидетельствовать о взаимодействии металлсодержащих наполнителей порошковой эпоксидно-полиэфирной композиции с кремнекислородными связями хризотиловых частиц.

Химический состав порошковых композиций без наполнителя и с модифицированными волокнами хризотила представлен на рис. 3–5.

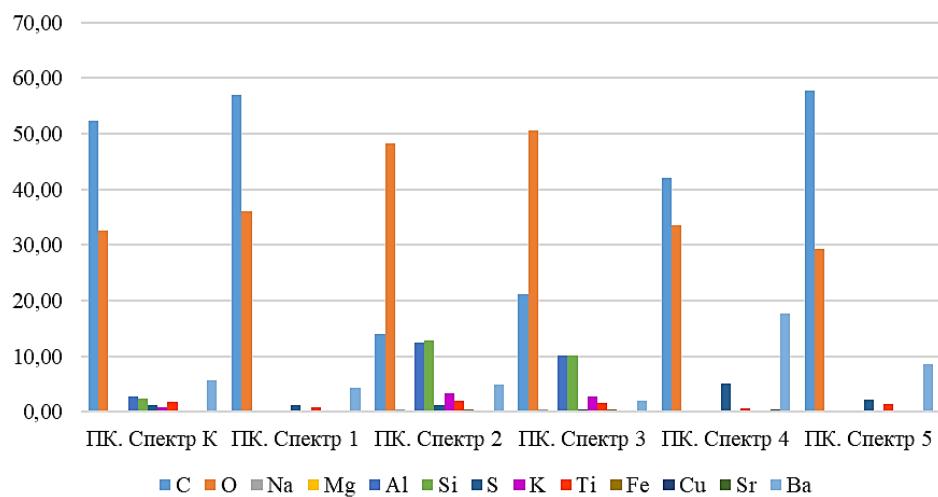


Рис. 3. Химический состав исходной полимерной композиции
Fig. 3. Chemical composition of the initial polymer composition

Основными элементами химического состава исходной эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции (рис. 3) являются углерод, кислород, барий, кремний, алюминий, сера, медь, магний, титан, железо. Данные химические элементы соответствуют эпоксидно-полиэфирной матрице, наполнителям и пигментам, улучшающим качественные показатели готового покрытия. Барий в составе бланфакса, оксид титана, сульфидсодержащую медь вводят в состав порошка в качестве пигментирующих, оттеночных составляющих. Кремний, магний, алюминий, натрий, калий находятся в составе слюды, в зависимости от ее типа. Слюда в качестве наполнителя порошковой системы улучшает физико-механические свойства покрытий, придает устойчивость к фактору внешних воздействий и декоративность. Алюминийсодержащий компонент может находиться в составе композиции в качестве наполнителя, улучшающего объем, адгезию порошка по поверхности металла. Оксид кремния вводят в состав порошковой системы для регулирования вязкости расплава, повышения текучести и адгезионных свойств порошка.

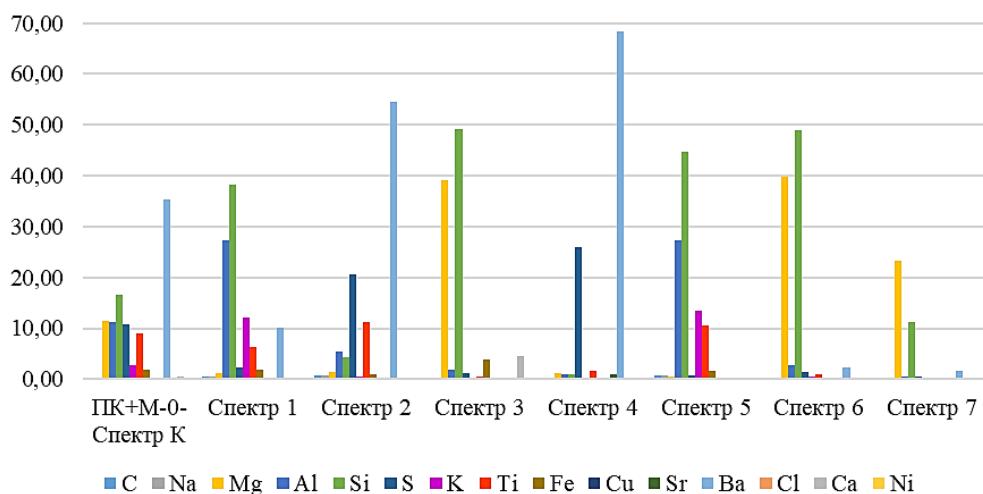


Рис. 4. Химический состав полимерной композиции с измельченными волокнами хризотила
Fig. 4. Chemical composition of polymer composition with milled chrysotile fiber

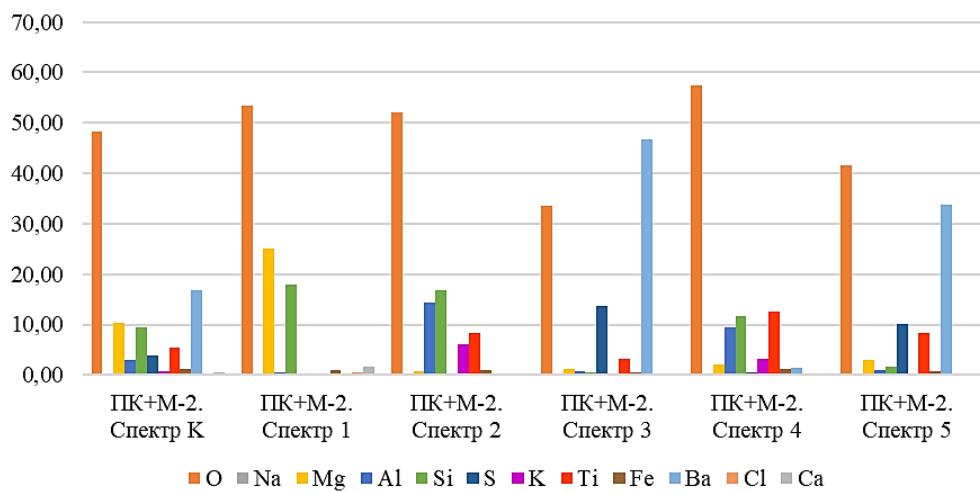


Рис. 5. Химический состав полимерной композиции с обработанными NH₄Cl волокнами хризотила
Fig. 5. Chemical composition of polymer composite with NH₄Cl-modified chrysotile fiber

При введении в исходную эпоксидно-полиэфирную композицию измельченных волокон хризотила (рис. 4) происходит увеличение содержания магния, кремния, алюминия, железа, что объясняется химическим составом волокон. Алюминий и железо могут присутствовать в качестве примесных элементов в составе природных волокон хризотила.

Химический состав порошковой композиции (рис. 5) с модифицированными NH₄Cl волокнами хризотила показывает появление в ее составе кислорода и уменьшение количественного состава вышеупомянутых элементов. Данный факт можно объяснить тем, что при обработке волокон хризотила хлоридом ам-

мония происходит изменение их электроповерхностных свойств [10], что способствует перераспределению элементов композиции на поверхности волокон.

Результаты испытаний эпоксидно-полиэфирных покрытий на коррозионную устойчивость в агрессивных средах представлены на рис. 6.

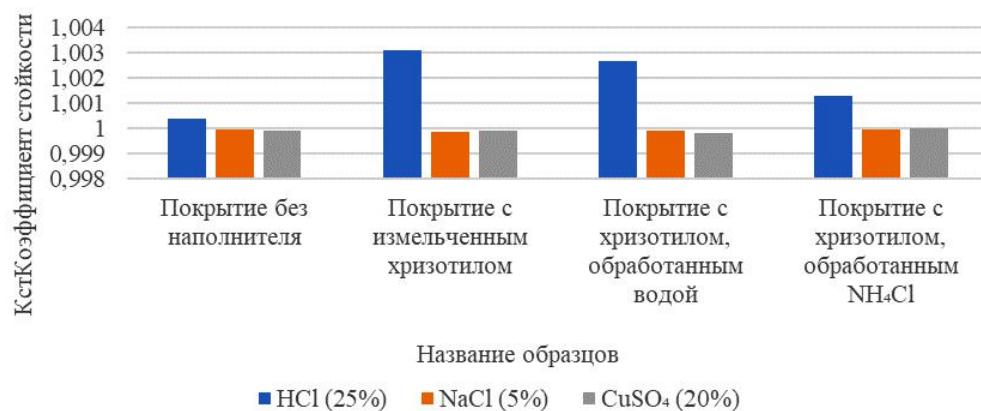


Рис. 6. Химическая стойкость эпоксидно-полиэфирных покрытий
Fig. 6. Chemical resistance of epoxy-polyester coatings

Анализируя полученные данные по химической устойчивости эпоксидно-полиэфирных покрытий (рис. 6) с модифицированными волокнами хризотила, можно отметить повышение коррозионной устойчивости наполненных покрытий: в среде 25%-го раствора HCl; в среде 20%-го раствора CuSO₄ – для покрытия с волокнами, модифицированными 5%-м раствором NH₄Cl; в среде 5%-го раствора NaCl – с измельченными волокнами хризотила. Отклонения показателя химической стойкости полимерного покрытия на 1 % считаются допустимыми, в соответствии с государственными стандартами.

Результаты анализа пористости эпоксидно-полиэфирных покрытий без наполнителя и с модифицированными волокнами хризотила, а также диаграммы их температурной устойчивости представлены на рис. 7, 8.

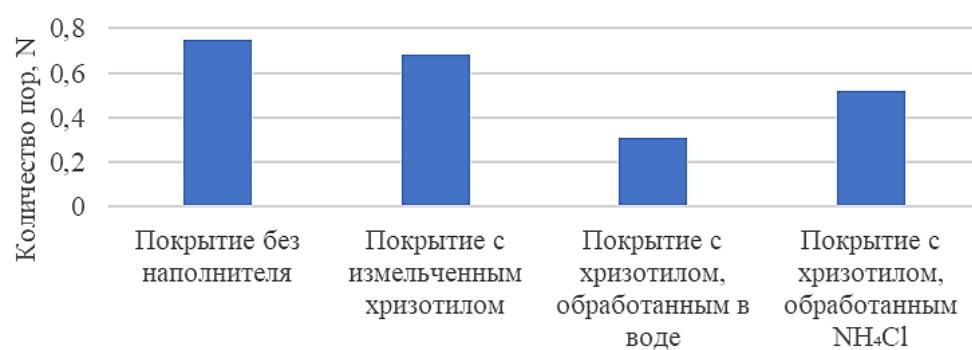


Рис. 7. Пористость эпоксидно-полиэфирных покрытий
Fig. 7. Porosity of epoxy-polyester coatings

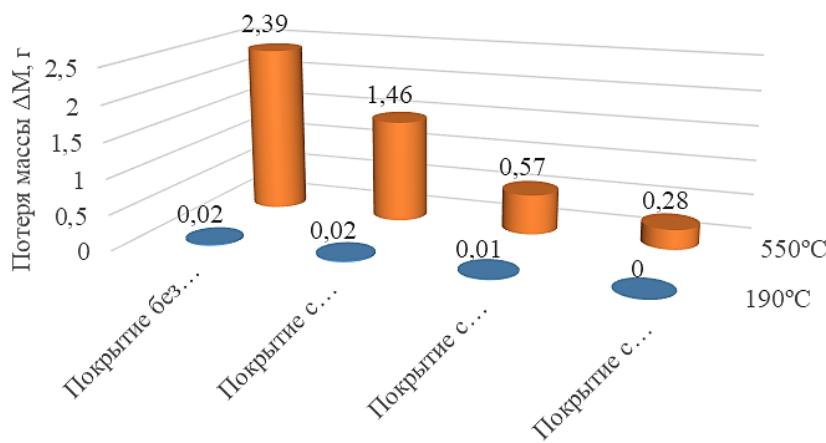


Рис. 8. Температурная устойчивость эпоксидно-полиэфирных покрытий
Fig. 8. Temperature resistance of epoxy-polyester coatings

Представленные на рис. 7 диаграммы пористости эпоксидно-полиэфирных покрытий свидетельствуют о снижении пористости покрытий с использованием в качестве наполнителя модифицированных волокон хризотила.

Анализируя представленные на рис. 8 диаграммы температурной устойчивости эпоксидно-полиэфирных покрытий, выдержаных при температурах 190 и 550 °C, можно отметить, что меньше всего потеряли массу образцы с модифицированными волокнами хризотила.

Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты исследования химического состава исходной и наполненной модифицированными волокнами хризотила эпоксидно-полиэфирной порошковой композиции. Показано химическое взаимодействие между компонентами порошковой композиции и волокнами хризотила.

Наполненные полимерные покрытия имеют повышенную химическую устойчивость в среде 25%-го раствора HCl, для покрытий с измельченными и обработанными хлоридом аммония волокнами соответственно в средах 5%-го раствора NaCl и 20%-го раствора CuSO₄.

Установлено, что пористость эпоксидно-полиэфирных покрытий с наполнителями на основе модифицированных волокон хризотила меньше на 40–70 % по сравнению с ненаполненными.

При 550 °C потери массы для наполненных эпоксидно-полиэфирных покрытий на 11 и 23 % меньше по сравнению с ненаполненными.

Результаты проведенных исследований подтверждают возможность использования модифицированных волокон хризотила в качестве наполнителя эпоксидно-полиэфирных покрытий для улучшения их физико-химических свойств. Дальнейшая работа будет направлена на совершенствование и оптимизацию состава порошковой краски с использованием отечественных ингредиентов, а также на отработку способов модификации хризотиловых волокон и их введения в состав порошка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. и др.* Многофакторная параметризация адгезионной прочности полимерных порошковых покрытий // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2023. Т. 79. № 3. С. 63–69. EDN: OXGZLY
2. *Нестерова А.Г., Кирпаль Ю.Г.* Современное производство порошковых лакокрасочных материалов // Химическая промышленность сегодня. 2022. № 4. С. 44–52. DOI: 10.53884/27132854_2022_4_44
3. *Бондарь М.А., Латыпов О.Р., Бугай Д.Е.* Разработка состава интеллектуального покрытия для защиты от коррозии оборудования нефтепереработки // Инженерная физика. 2023. № 7. С. 3–6. DOI: 10.25791/infizik.7.2023.1339. EDN: HVIGCS
4. *Прокопчук Н.Р., Шутова А.Л., Казаков П.П.* Химия и физика пленкообразующих веществ. Минск : БГТУ, 2014. 365 с. ISBN 978-985-530-310-8. EDN: UYQDIQ
5. *Осовская И.И., Зверева В.А.* Порошковая полизифирная краска для полимерных покрытий // Вестник ТвГУ. Серия: Химия. 2018. № 2. С. 111–117. EDN: YMJWTZ
6. *Гусева Е.А., Константинова М.В.* Порошковые полимерные покрытия как альтернативный способ защиты металлов от коррозии // Вестник ИрГТУ. 2015. № 10 (105). С. 71–76. EDN: VCPCKJ
7. *Яковлев А.Д.* Актуальные вопросы технологии порошковых лакокрасочных материалов и покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2002. № 4. С. 20–25.
8. *Кухта Т.Н., Прокопчук Н.Р.* Пленкообразователи порошковых красок и их отвердители // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2018. № 1 (205). С. 40–52. EDN: YXOИНЕ
9. *Кухта Т.Н., Прокопчук Н.Р.* Эксплуатационные свойства покрытий из порошковых полизифирных красок // Труды БГТУ. Химия и технология органических веществ, материалов и изделий. 2015. № 4. С. 139–146. EDN: XBWOJF
10. *Наумова Л.Н., Черкашина Н.И.* Изменение электрокинетического потенциала волокон гидросиликата магния при обработке хлоридом аммония // Коллоидный журнал. 2018. Т. 80. № 5. С. 551–555. DOI: 10.1134/S0023291218050117. EDN: XWMXTV
11. *Наумова Л.Н.* Структурно-морфологические изменения характеристик хризотила под действием модифицирующих факторов // Казанская наука. 2010. № 10. С. 55–57.
12. *Наумова Л.Н.* Влияние кислой среды на свойства хризотицементной пыли // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 24–26. EDN: NYATFD
13. *Коровкин М.В., Ананьева Л.Г.* Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов. Томск : Изд-во ТПУ, 2016. 96 с.
14. *Накамото К.* ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / под ред. Ю.А. Пентина ; пер. с англ. Л.В. Христенко. Москва : Мир, 1991. 536 с.
15. *Дехант И.* Инфракрасная спектроскопия полимеров : пер. с нем. / под ред. Э.Ф. Олейника. Москва : Химия, 1976. 472 с.

REFERENCES

1. *Fedyayev V.L., Galimov E.R., Belyayev A.V., et al.* Multifactorial Parameterisation of Adhesive Strength of Polymer Powder Coatings. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2023; 79 (3): 63–69. EDN: OXGZLY (In Russian)
2. *Nesterova A.G., Kirpal' Yu.G.* Modern Production of Powder Coatings. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2022; (4): 44–52. DOI:10.53884/27132854_2022_4_44 (In Russian)
3. *Bondar' M.A., Latypov O.R., Bugai D.E.* Development of Intelligent Coating Composition for Corrosion Protection of Oil Refining Equipment. *Inzhenernaya fizika*. 2023; (7): 3–6. DOI: 10.25791/infizik.7.2023.1339. EDN: HVIGCS (In Russian)
4. *Prokopchuk N.R., Shutova A.L., Kazakov P.P.* Chemistry and Physics of Film-Forming Substances. Minsk: BGTU, 2014. 365 p. ISBN: 978-985-530-310-8. (In Russian)
5. *Osovskaya I.I., Zvereva V.A.* Powder Polyester Paint for Polymer Coatings. *Vestnik TGU. Ser.: Khimiya*. 2018; (2): 111–117. (In Russian)

6. Guseva E.A., Konstantinova M.V. Powder Polymer Coatings as an Alternative Method of Protecting Metals from Corrosion. *Vestnik IrGTU*. 2015; 10 (105): 71–76. (In Russian)
7. Yakovlev A.D. Relevant Issues in Powder Coating Technology and Coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*. 2002; (4): 20–25. (In Russian)
8. Kuhta T.N., Prokopchuk N.R. Film Formers for Powder Paints and Their Hardeners. *Trudy BGTU. Ser. 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya*. 2018; 1 (205): 40–52. EDN: YXOIH (In Russian)
9. Kuhta T.N., Prokopchuk N.R. Performance Properties of Powder Polyester Paint Coatings. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv, materialov i izdelij*. 2015; (4): 139–146. (In Russian)
10. Naumova L.N., Cherkashina N.I. Variations in the Electrokinetic Potential of Magnesium Hydro-silicate Fibers upon Treatment with Ammonium Chloride. *Colloid Journal*. 2018; 80 (5): 522–526.
11. Naumova L.N. Changes in Chrysotile Structure and Morphology due to Modifying Factors. *Kazanskaya nauka*. 2010; (10): 55–57. (In Russian)
12. Naumova L.N. Acidic Environment Effect on Properties of Chrysotile Cement Dust. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011; (2): 24–26. (In Russian)
13. Korovkin M.V., Anan'eva L.G. Infrared Spectroscopy of Carbonate Minerals. Tomsk: TPU, 2016. 96 p. (In Russian)
14. Nakamoto K. IR and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Yu.A. Pentin, Ed., Moscow: Mir, 1991. 536 p. (Russian translation)
15. Dechant J., et al. Ultrarotspektroskopische Untersuchungen an Polymeren. E.F. Oleinik, Ed., Moscow: Khimiya, 1976. 472 p. (Russian translation)

Сведения об авторе

Наумова Людмила Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, naymova_ln@mail.ru

Author Details

Lyudmila N. Naumova, PhD, A/Professor, Belgorod Shukhov State Technological University, 46, Kostyukov Str., 308012, Belgorod, Russia, naymova_ln@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.07.2025
Одобрена после рецензирования 05.08.2025
Принята к публикации 09.10.2025

Submitted for publication 15.07.2025
Approved after review 05.08.2025
Accepted for publication 09.10.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 212–226.

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 (6): 212–226.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 549.642:549.07+67.0048+553.61

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-212-226

EDN: JIFYYL

ОСОБЕННОСТИ НАНО-МЕЗОСТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКИ В СТЕКЛАХ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анатолий Васильевич Мананков

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

Аннотация. Актуальность. Различные попытки объяснения кристаллизации вязких силикатных расплавов в условиях разной стационарности обусловлены растущей потребностью в новых материалах, обеспечивающих технологический прогресс. В настоящее время принято считать, что все многообразие твердых материалов охватывается несколькими фазовыми состояниями с кристаллическими структурами, починающимися федоровским пространственным группам. Элементарная ячейка обладает параметрами, транслируя которые, можно построить достаточно реалистичную картину описания кристаллов, определяемую фазой по Гиббсу. Данные экспериментальной минералогии часто расходятся с традиционными представлениями, особенно при описании аномальной кинетики диффузии и кристаллизации в стеклах и ситаллах.

Цель работы – разработка способа описания кристаллов, учитывающего силы не менее равной величины, так или иначе связанные с внутренними свойствами и колебательными модами. Для этого мы использовали нашу голографическую модель вещества, в которой эти взаимодействия могут образовывать собственные когерентные структуры со своими типами резонансных решеток.

Решены следующие задачи: выявлены факторы структурной упорядоченности, определяемые пространственно-временной когерентностью; обоснована резонансная модель динамических структур, адекватно описывающая кинетику низкоэнергетических фазовых превращений; разработана классификация материалов по природе связей и типам когерентности.

Методы. Модель обобщенного подхода к оценке разномасштабных процессов и явлений основана на результатах экспериментальных исследований и их анализе с учетом известных представлений электродинамики и волновой механики.

Результаты. Впервые разработана модель пространственно замкнутых динамических структур реального вещества, описывающая объекты и взаимодействия на микро-, мезо- и макроуровнях как совокупность автоинтерференции замкнутого волнового процесса. Взаимодействие между областями конструктивной интерференции происходит на частотах биений основного волнового процесса, генерируя пространственную решетку следующего иерархического уровня.

Ключевые слова: метасиликаты, сикам, петро-шлакоситаллы, минеральное сырье, промышленные отходы, автоинтерференция, спинодальный распад, изоморфизм

Для цитирования: Мананков А.В. Особенности нано-мезоструктурной динамики в стеклах при создании новых материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 212–226. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-212-226. EDN: JIFYYL

ORIGINAL ARTICLE

**DYNAMICS OF GLASS NANO-MESOSTRUCTURE
IN CREATING NEW MATERIALS****Anatoly V. Manankov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. *Relevance.* Various attempts to explain crystallization of viscous silicate melts under varying steady-state conditions are driven by the growing need for new materials that enable the technological progress. It is currently accepted that the entire diversity of solid materials is encompassed by several phase compositions with the crystal structure obeying Fedorov space groups. The unit cell has parameters, translating which one can construct a fairly realistic picture of the crystal description, determined by the Gibbs phase. Experimental mineralogy data often diverge from traditional concepts, especially when describing the anomalous kinetics of diffusion and crystallization in glasses and glass-ceramics.

Purpose: The development of a method for describing crystals with respect to forces of at least equal magnitude, which relate to internal properties and oscillatory modes. The holographic model of matter is proposed, in which these interactions can form their own coherent structures with their own types of resonant lattices.

Methodology: The generalized approach is used to assess multi-scale processes and phenomena based on the experimental data and their analysis, taking into account well-known concepts of electrodynamics and wave mechanics.

Research findings: The factors of structural order are determined by spatio-temporal coherence; a resonance model of dynamic structures that adequately describes the kinetics of low-energy phase transitions is substantiated; materials are classified according to the nature of bonds and types of coherence.

Value: For the first time, a model of spatially closed dynamic structures of real matter is developed to describe objects and interactions at the micro-, meso- and macro-levels as a set of auto-interference of a closed wave process. The interaction between areas of constructive interference is observed at frequencies of the main wave process, generating a spatial lattice of the next hierarchical level.

Keywords: metasilicates, sikam, petrurgical glass-ceramics, mineral raw materials, industrial waste, auto-interference, spinodal decomposition, isomorphism

For citation: Manankov A.V. Dynamics of Glass Nano-Mesostructure in Creating New Materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 212–226. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-212-226. EDN: JIFYYL

Введение

Существующие модели фазовых переходов в силикатных расплавах, со- средоточенные на процессах на границе кристалл – расплав [1], не объясняют наблюдаемую кинетику из-за ограничений диффузии. Высокие скорости кристаллизации стекол потребовали разработки новых подходов, учитывающих их структуру и реологию [2, 3]. Предложенная динамическая модель [4] связывает скорость кристаллизации с глубиной переохлаждения и режимами термообработки. Согласно этой модели ориентация молекулярных агрегатов под действием внутренних сил и рост полимеризации расплава минимизируют роль диффузионного переноса.

Развитие теории поляризационных взаимодействий (взаимодействия поляронов) в кристаллофизике [5–9] показало, что предварительная ориентация

поляризованных молекул по кристаллической решетке снижает энергию активации фазового перехода.

Экспериментальные данные по аномально высоким скоростям перемещения примесей при кристаллизации метасиликатных стекол (экспериментальная минералогия) и представления о волновой природе связей [10–13] легли в основу голографической модели вещества (ГМВ) [14]. ГМВ связывает геометрию тора с конфигурацией электромагнитного поля. Экспериментальные наблюдения свидетельствуют, что вещество – это состояние электромагнитного поля в пространстве. Тождественность уравнений механики сплошных сред (Эйлера) и электродинамики (Максвелла) позволяет рассматривать поле как деформацию пространства.

Электромагнитное поле описывается тремя взаимосвязанными векторами ('E', 'H', 'P' – вектор Умова – Пойнтинга). Условие их компланарности (лежание в одной плоскости) основано на смешанном произведении [15–17]. Ненулевой ротор вектора 'P' ($\text{rot } P \neq 0$) описывает локализованный объект (аналог частицы), стабилизируемый топологией тора (теорема Ляпунова). Интерференция таких волновых объектов формирует структуры вещества.

ГМВ [14, 20–24], развитая на основе экспериментальных данных, полученных в Томском государственном университете, служит основой данной работы. Модель дает наглядную физическую картину, дополняя формальные методы (статистическая термодинамика, квантовая химия, неравновесная термодинамика, синергетика, фракталы) [18, 19]. Устойчивость структур объясняется когерентностью, а связи – резонансом, что подтверждается соответствием расчетных и реальных кристаллических структур [21–24].

В рамках ГМВ предложена классификация из семи типов когерентности (табл. 1), выделенных по доминирующим взаимодействиям: электрическим (e), магнитным (m), механическим (p) и их комбинациям. Типы 1–6 – неорганические материалы. Тип 7 (e + m + p) предположительно включает биологические и сложные органоминеральные системы, где структурную роль могут играть протонные решетки. ГМВ объясняет морфологическое сходство минералов (дendриты, листовидные, семевидные формы) с биологическими объектами не дефектами, а проявлением их глубинной волновой структуры, реализующей сложные интерференционные комбинации.

Таблица 1
Типы когерентности и общая классификация материалов

Table 1

Types of coherence and classification of materials

№ п/п	Тип когерентности	Структурный класс материалов
1	Электронная (Э)	Ионные кристаллы
2	Магнонная (М)	Металлы
3	Фононная (Ф)	Стекла
4	Электронно-магнонная (Э-М)	Полупроводники
5	Электронно-фононная (Э-Ф)	Стеклокристаллические (ситаллы, каменное литье, керамика)
6	Магнонно-фононная (М-Ф)	Металлические стекла
7	Электронно-магнонно-фононная (Э-М-Ф)	Живые и органоминеральные

Традиционная аналитическая техника сегодня эффективно идентифицирует преимущественно электронные взаимодействия и структуры с электронной когерентностью. Нелинейность структуры иногда фиксируется по аномалиям ширины дифракционных рефлексов, однако для описания реальных структур требуются методы анализа поверхностей высших порядков.

Резонансные принципы и их роль в материаловедении

Природные объекты, формирующиеся по волновым законам с периодической упорядоченностью, распространены на всех масштабах – от космических до наноразмерных. Новые теории подтверждают участие в этих процессах низкоэнергетического протонирования. Например, электронно-протонная теория лежит в основе физико-химических механизмов выщелачивания оксидных минералов в гидрометаллургии [24]. Устройства с минералами слоистой структуры для протонных мембран и комбинированными источниками ионов применяются при обработке алмазов и других ювелирных материалов [25, 26, 27, 28].

Идея голограмической природы мира, согласующаяся с фундаментальным открытием корпускулярно-волнового дуализма, получила развитие в трудах Д. Бома и К. Прибрама [29]. Экспериментальное подтверждение (1982 г.) способности элементарных частиц к мгновенной корреляции на расстоянии [30], хотя и противоречащее постулату А. Эйнштейна, стимулировало развитие волновых концепций М. Талботом и другими исследователями [31]. Формированию голограмических идей также способствовали работы Н.А. Козырева в астрофизике [32] и многолетние исследования волновых проявлений в минералогии А.М. Кузьмина [33], который установил подчиненность структурной ритмики кристаллов волновым числам установившихся колебаний.

Несмотря на давнюю известность проблематики, изучение организации надатомных структур в материаловедении отстает от атомного уровня. В отличие от развитых квантово-механических подходов, надатомная организация часто описывается эмпирически с привлечением концепций доменов, кластеров и мицелл. Развитие мезомеханики (школа акад. В.Е. Панина) направлено на квантовое описание дефектов кристаллов через уравнения деформации, исторически применяющиеся Эйлером и Максвеллом [34], но имеющие ограниченную применимость, вероятно, из-за локальности евклидовой геометрии.

В электронных моделях кристаллов магнитные и механические взаимодействия, сопоставимые по значимости с электронными, часто относят к дефектам структуры. Однако эти взаимодействия (обменные и колебательные) способны формировать самостоятельные когерентные структуры с магнонными и фононными резонансными решетками, что лежит в основе ряда технологических прорывов, например, в создании квантовых вычислителей на основе фотонной материи [35].

Химическая дифференциация в природе, управляемая автоколебательными процессами и протонно-гидратационными механизмами, проявляется в периодических структурах разного масштаба. Аномально крупные размеры таких образований, обусловленные низкоэнергетической активацией, противоречат традиционным термодинамическим моделям. В фазовых превращениях ключевая роль принадлежит диффузионным и инфильтрационным потокам

[36], векторные поля которых могут стабилизировать или дестабилизировать систему, вызывая вихревые эффекты при нестационарности. На макроскопическом уровне значимы электромагнитные и гравитационно-кинетические полевые структуры.

Квазистационарные процессы минералообразования обычно реализуются через связанные гидратационный и протонно-гидратационный механизмы, которые, взаимопорождаясь по волновому принципу, обусловливают ритмическое чередование стадий протонирования и гидратации. Эта ритмика проявляется в пространственно-временных вариациях кинетических параметров, приводя к формированию кристаллических агрегатов. Низкая энергоемкость и высокая скорость процесса по сравнению с классической ионной сборкой объясняются как участием надатомных наноблоков (прима-тел) [37], так и механизмами спинодальной декомпозиции и супердиффузии. На этой основе выделен новый класс стеклокристаллических материалов с электронно-фононной когерентностью [39]. Разработанные технологии защищены патентами, отмечены наградами ВДНХ и международными премиями, а сам механизм спинодального распада стал самостоятельным разделом экспериментальной минералогии [41–45].

Реализация волновой концепции в создании ситаллов

Ситаллы – синтетические конструкционные материалы с широким спектром свойств (высокая износостойкость, термо- и кислотоупорность, полупроводниковые характеристики). Для получения метасиликатных ситаллов (система $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$) исходную шихту из природного сырья или отходов корректируют до состава с модулем кислотности $M_k = 1$ [40], обеспечивая равенство мольных долей в катионных подрешетках пироксенов (табл. 2). После плавления при 1360–1400 °C в течение 1,5–2 ч шихта подвергается закалке и последующему отжигу. Полученные гомогенные стекла исследуются методами дифференциального термического анализа (ДТА) для определения температур зародышеобразования (T_1) и роста кристаллов (T_2) (табл. 3).

Таблица 2

Кристаллохимические формулы петроситаллов

Table 2

Crystal and chemical formulas of petrurgical glass-ceramics

№ пробы	Подрешетки в формуле пироксенов		
	M_2	M_1	R
1	$(\text{Ca}_{0,86} \cdot \text{Na}_{0,13} \text{K}_{0,01})$	$(\text{Ca}_{0,06} \text{Mg}_{0,29} \text{Fe}^{+2}_{0,18} \text{Fe}^{+3}_{0,13} \text{Al}_{0,34})$	$(\text{Si}_{1,65} \text{Ti}_{0,01} \text{Al}_{0,34})\text{O}_6$
2	$(\text{Ca}_{0,9} \cdot \text{Na}_{0,09} \text{K}_{0,01})$	$\text{Mg}_{0,4} \text{Fe}^{+2}_{0,22} \text{Fe}^{+3}_{0,22} \text{Al}_{0,20}$	$(\text{Si}_{1,57} \text{Ti}_{0,02} \text{Al}_{0,41})\text{O}_6$
3	$(\text{Ca}_{0,83} \text{Na}_{0,08} \text{K}_{0,09})$	$(\text{Ca}_{0,4} \text{Mg}_{0,13} \text{Fe}^{+2}_{0,13} \text{Fe}^{+3}_{0,08} \text{Al}_{0,25})$	$(\text{Si}_{1,81} \text{Ti}_{0,02} \text{Al}_{0,16})\text{O}_6$
4	$(\text{Ca}_{0,74} \text{Na}_{0,18} \text{K}_{0,09})$	$(\text{Ca}_{0,29} \text{Mg}_{0,16} \text{Fe}^{+2}_{0,11} \text{Fe}^{+3}_{0,07} \text{Al}_{0,38})$	$(\text{Si}_{1,79} \text{Ti}_{0,02} \text{Al}_{0,18} \text{P}_{0,01})\text{O}_6$

Динамические управляющие решетки материала могут формироваться на стадии стекла внешними воздействиями: термомеханическими, акустическими или электромагнитными. Их параметры зависят от частоты воздействий,

свойств материала и резонансных характеристик образца, включая его геометрию. Низкочастотные объемные колебания, модулируемые формой и размерами изделия, также влияют на структурообразование, что демонстрирует упорядоченное распределение газовых пузырей в стеклянном шаре (рис. 1).

Таблица 3
Результаты ДТА стекол на основе базитов Полярного Урала
Table 3
DTA results for basite-based glass from Polar Urals

№ пробы	T_1 , °C	E_1 , мВт/мг	T_2 , °C	E_2 , мВт/мг
1	723	0,391	905	0,494
2	711	0,423	897	0,812
3	742	0,321	951	0,591
4	727	0,360	964	0,686

Примечание. T_1 – температура образования зародышей основной фазы; T_2 – температура роста кристаллов; E_1 – энергия активации зародышеобразования; E_2 – энергия роста кристаллов. Номера проб 1–4 соответствуют номерам в табл. 2.

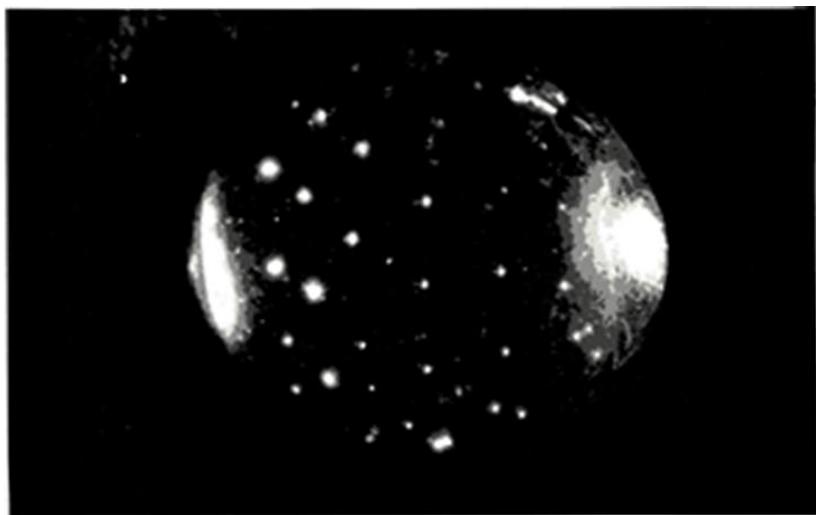


Рис. 1. Распределение газовых пузырей в стеклянном шаре метасиликатного состава по узлам геометрически правильной объемной решетки. $\times \frac{1}{4}$ натуральной величины
Fig. 1. Distribution of gas bubbles in a glass sphere of meta-silicate composition in the nodes of a geometrically regular three-dimensional lattice. Magnification: $\times \frac{1}{4}$ of actual size

Подтверждением возможности неевклидовых надатомных структур являются фуллерены. Особое значение имеют решетки, формируемые «сильными» ионами (например, Cr, Ag – катализаторы зародышеобразования), чьи ничтожные концентрации существенно влияют на свойства. Кольцевые структуры электронной плотности, индуцируемые протонами (рис. 2), действуют как резонаторы теплового излучения, генерируя стоячие волны, которые упорядочивают

структуре при нагреве. Ионы с большим радиусом обменных взаимодействий (~ 1 мкм) также формируют управляющие решетки. Фрактальные структуры кристаллизации хромшпинели (рис. 3) демонстрируют строгую упорядоченность с размерными соотношениями, описываемыми простыми числами.



Рис. 2. Кольцевые структуры электронной плотности, индуцированные протонами, на начальной стадии кристаллизации стекла. $\times 10\,000$

Fig. 2. Proton-induced ring structures of electron density at the initial stage of glass crystallization. Magnification: $\times 10,000$

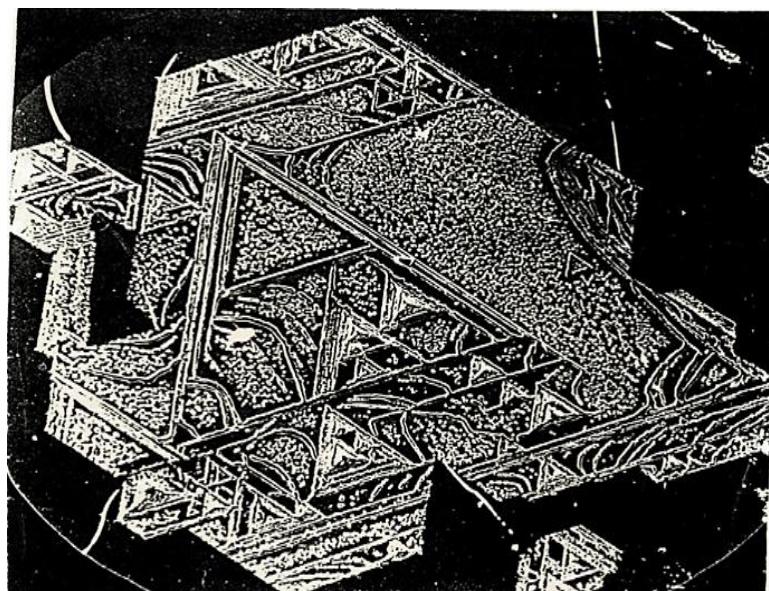


Рис. 3. Заполнение решетки критических тел хромшпинели в стекле. Размеры критических тел связаны отношениями простых чисел ($1/2, 1/4, 3/4$ и т. д.). $\times 10\,000$

Fig. 3. Filling of the lattice of chromium spinel critical bodies in glass. The dimensions of critical bodies are related by simple number ratios ($1/2, 1/4, 3/4$). Magnification: $\times 10,000$

Метасиликатные системы характеризуются высокой когерентностью и уникальной кинетикой фазовых превращений, проявляющейся в субмезоструктурах спинодального распада (рис. 4). РФА подтверждает соответствие ситаллов твердым растворам пироксен-волластонита или диопсид-геденбергитового ряда (рис. 5), определяющим их свойства [38, 39, 41–45].

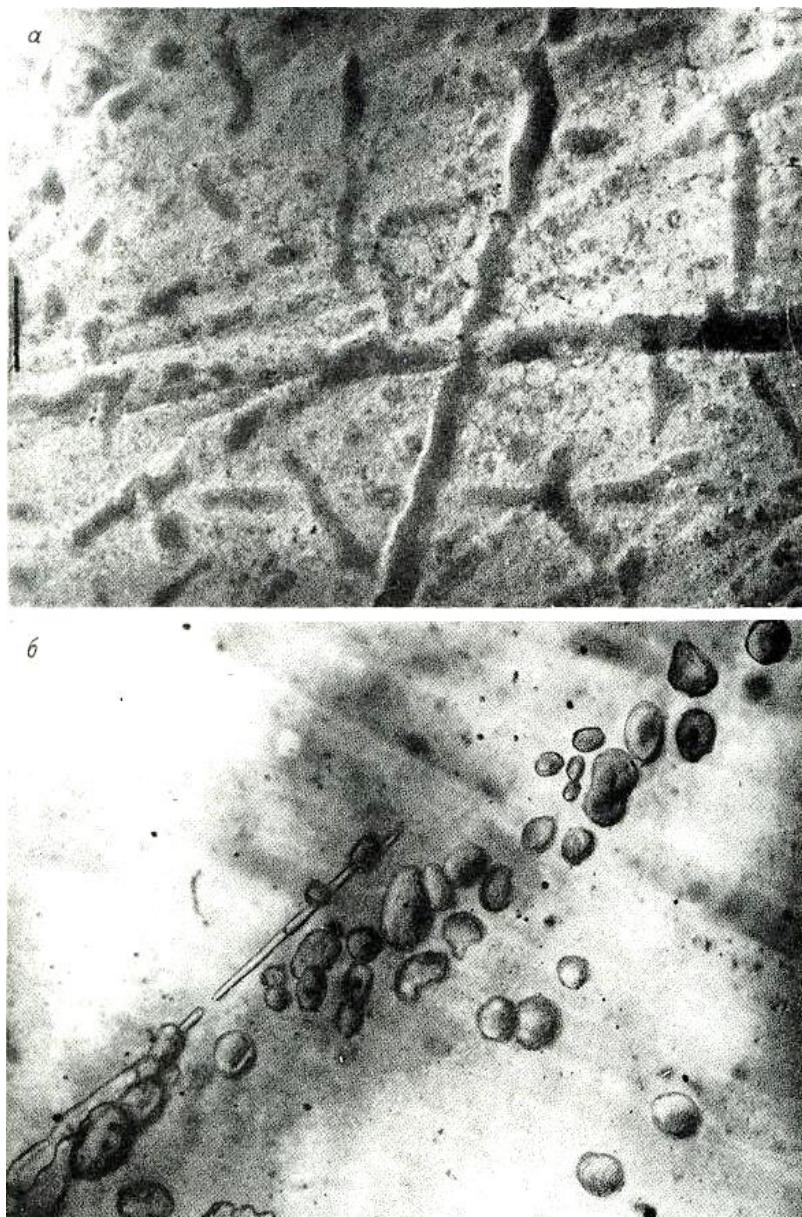


Рис. 4. Субмезоструктура спинодального распада в нагреваемом исходном стекле после его закалки. $\times 10\,000$

Fig. 4. Sub-mesostructure of spinodal decomposition in heated initial glass after quenching. Magnification: $\times 10,000$

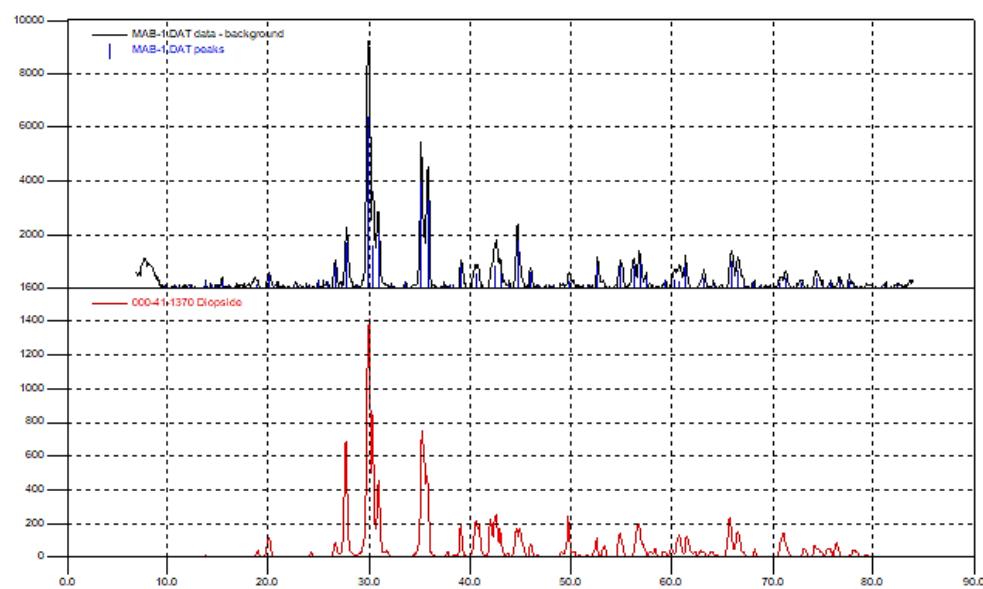


Рис. 5. Рентгенограмма петроситалла класса СКС, образец № 1 (вверху) и эталонный диопсид № 000-41-1370 (внизу) из ASTM (Crystallographica Search-Match)

Fig. 5. XRD pattern of SCS-class petrurgical glass-ceramics, sample 1 (top) and reference diopside No. 000-41-1370 (bottom) from ASTM (Crystallographica Search-Match)

Петроситаллы класса «сикам» (табл. 4) превосходят традиционные материалы (каменное литье, бетон, чугун) по ряду параметров:

- механические показатели: прочность при сжатии (до 909 МПа) и изгибе (до 188 МПа), износостойкость;
- термические свойства: температура размягчения (950–1100 °C), КЛТР (65–114·10⁻⁷ °C⁻¹);
- химическая стойкость: устойчивость к воздействию H₂SO₄ (94,6–99,9 %) и NaOH (98,0–99,0 %);
- экономичность: низкая стоимость кубометра материала.

Таблица 4

**Свойства петроситаллов класса «сикам»
и других конструкционных материалов**

Table 4

Properties of petrurgical glass-ceramics and other constructional materials

Показатель (свойство)	Петроситаллы класса «сикам»	Каменное литье*	Бетон*	Чугун*
Коэффициент линейного расширения (КЛР) 10 ⁷ °C ⁻¹	65–114	48–100	100	100
Температура начала размягчения, °C	950–1100	900–1050	–	–
Сопротивление истиранию, г/см ²	0,015–0,04	0,02–0,08	–	–
Предел прочности, МПа при статическом изгибе	100–188	47–80	–	280

Окончание табл. 4
End of table

Показатель (свойство)	Петроситаллы класса «сикам»	Каменное литье*	Бетон*	Чугун*
Предел прочности при сжатии, МПа	707–909	250–500	5–60	800–1000
Химическая стойкость, %: H ₂ SO ₄ NaOH	94,6–99,9 98,0–99,0	99,8 98,5	— —	— —
Стоимость 1 куб. м материалов, руб.*	9000 на заводе петроситаллов	30 000	18 000– 24 000 в ЯНАО	112 000

* По данным [49].

Эти свойства делают их перспективным материалом для использования в экстремальных условиях Арктики, при строительстве дорог (включая плиты, трубопроводы на сваях), создании взлетно-посадочной полосы (ВПП) и морских терминалов, возведении буровых платформ на шельфе, в т. ч. подводных станций из стаце-ситалловых тюбингов, в качестве футеровочных материалов [46, 47].

Перспективность подтверждается активным освоением арктических ресурсов, включая разработку технологий добычи газогидратов [48].

Заключение

В развитие идеи В.И. Вернадского о неевклидовом характере геометрии в природе [50] автором предложена концепция структур минерального вещества на основе голографической модели вещества, постулирующей его электромагнитную природу и формирование через интерференцию. Структурная упорядоченность определяется пространственно-временной когерентностью электронных, магнонных и фононных взаимодействий и их комбинаций (7 типов).

Экспериментально подтверждена ключевая роль спинодальной декомпозиции в образовании ситаллов электронно-фононного типа. Резонансная модель динамических структур адекватно описывает кинетику фазовых превращений. Результаты имеют правовую защиту, они способствуют развитию минералогии, рациональному использованию сырья и созданию конкурентоспособных стекло-кристаллических материалов со множеством новых свойств.

На основе этих исследований создан новый класс многофункциональных материалов – синтетических метасиликатов – с уникальным сочетанием физико-химических свойств. Они нашли применение в 30 областях, включая медицину (хирургия, стоматология), производство бытовой и аэрокосмической техники, а также в качестве модификаторов для керамики, полиэтилена, линолеума и асфальта. Дополнительно материалы используются в качестве жаропрочных износостойких покрытий и в составе золо-шлакопроводов. Экономическая эффективность ситаллов подтверждена в проекте «Северный широтный ход».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эйттель В. Физическая химия силикатов. Москва : ИЛ, 1968. 1055 с.
2. Эпельбаум М.В. Расчет температуры максимальной скорости кристаллизации стекол // Стекло и керамика. 1958. № 4. С. 22–25.
3. Kirkpatrick R.J. Kinetics of crystal growth in the system $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ // Amer. J. Sci. 1974. V. 274. № 3. P. 215–242.
4. Мананков А.В., Локтюшин А.А. Динамическая модель кристаллизации // Физико-химическое моделирование в геохимии и петрологии на ЭВМ : материалы II Всесоюзного совещания. Иркутск, 1988. С. 70. EDN: GURKLZ
5. Борозновская Н.Н., Леснов Ф.П., Мананков А.В. О влиянии различных форм проявления калия на люминесценцию основных пластиоклазов // Материалы V Всесоюзного симпозиума по проблеме изоморфизма. Санкт-Петербург : РМО, 1981. С. 44–47. EDN: AKKZZM
6. Мананков А.В., Локтюшин А.А., Баев С.Ю. Динамика структуры F-агрегатных центров окраски в кристаллах // Материалы VI Всесоюзного симпозиума по изоморфизму. Москва : ГЕОХИ, 1988. С. 135. EDN: XJTKVA
7. Мананков А.В., Локтюшин А.А., Баев С.Ю. Радиационная сенсибилизация дефектов в кристаллах // Материалы VI Всесоюзного симпозиума по изоморфизму. Москва : ГЕОХИ, 1988. С. 136. EDN: QIMMXO
8. Локтюшин А.А., Мананков А.В. Поляризационная трансляция фазовых переходов и динамика образования метасиликатов щелочноземельных элементов в вязких расплавах // Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Сибири. Томск, 1990. Вып.1. С. 16–22. EDN: SCFNDX
9. Санина В.А., Головенчик Е.И. Поляризационные взаимодействия и фазовые переходы в кристаллах с двумя взаимодействующими подсистемами // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. Вып. 5. С. 905–909. EDN: RYOMJN
10. Мананков А.В. О механизме ликвации в силикатных системах // Дан СССР. 1979. Т. 246. № 4. С. 942–946. EDN: TLUSVF
11. Романов Б.П., Мананков А.В., Головко Н.В. Исследование твердых растворов системы клиноэнстатит – диопсид методами дилатометрии и электропроводности // Неорганические материалы. 1985. Т. 21. № 9. С. 1539–1543. EDN: ZSBIJR
12. Мананков А.В., Шарапов В.Н. Кинетика фазовых переходов в базитовых расплавах и магмах. Новосибирск : Наука, 1985. 199 с. EDN: TPMJVBX
13. Мананков А.В., Яковлев В.М. Нетрадиционные строительные материалы класса «силикатов» // Строительные материалы. 1995. № 9. С. 16–17.
14. Локтюшин А.А., Мананков А.В. Пространственно-замкнутые динамические структуры. Томск : Изд-во ТГУ, 1996. 121 с. EDN: SZSUF
15. Терлецкий Я.П. Электродинамика. Москва : Высшая школа, 1990. 129 с.
16. Мастерова М.А., Янц Ю.Г. Вектор Умова – Пойнтинга дипольного электрического и дипольного магнитного моментов. URL: <http://www.vestnik.adygnat.ru>
17. Звездин А.К., Матвеев В.М., Мухин А.А., Попов А.И. Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах. Москва : Наука. 1985. 294 с.
18. Мананков А.В. Астроминералогия – новая комплексная наука для решения сырьевых и экологических проблем биосфера // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 8. Томск. 2016. С. 204–211. EDN: XSIPRB
19. Мананков А.В. Самородные и редкоземельные металлы на Земле, Луне, в тектитах и метеоритах // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 2. С. 111–130. DOI: 10.21455/gpb2018.2-7. EDN: XOTZB
20. Мананков А.В. К теории формирования и прогноза месторождений полезных ископаемых // Геосферные исследования. 2019. № 4. С. 83–94. DOI: 10.17223/25421379/13/8. EDN: СККНQM
21. Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Харитонова Н.В. Кристаллохимические основы расчета мономинеральности ситаллов // Неорганические материалы. 2018. Т. 54. № 9. С. 984–992. DOI: 10.1134/S0002337X18090075. EDN: ZMYCZC
22. Мананков А.В., Гасанова Э.Р. Ситаллы из местного сырья для производства инновационных инфраструктур с высокой технико-экономической эффективностью в экстремальных

- условиях Крайнего Севера // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 11. С. 87–96. DOI: 10.18799/24131830/2018/11/212. EDN: YRXOHR
23. *Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Быкова В.В.* Физико-химические и технологические аспекты разработки ситаллов нового класса // Вестник Воронежского ГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 211–222. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-1-211-222. EDN: YWLIOA
24. *Мананков А.В., Горюхин Е.Я., Локтюшин А.А.* Волластонитовые, пироксеновые и другие материалы из промышленных отходов и недефицитного природного сырья. Томск : Изд-во ТГУ, 2002. 168 с. EDN: DELZJX
25. *Киприянов Н.А., Горичев Н.Г.* Электронно-протонная теория – фундаментальная основа физико-химического процесса выщелачивания оксидных минералов в гидрометаллургии // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2006. № 1 (12). С. 101–109. EDN: IJEXNR
26. *Заявка на изобретение* Российской Федерации, МПК H01J 37/08, H01J 3/04. Комбинированный источник ионов : № 2003119003 А : заявл. 24.06.2003 : опубл. 10.02.2005 / Конюков К.В., Турчин В.И., Шумшурев А.В., Беляев Г.Е., Кондратьев Б.К., Турчин А.В. Бюл. № 4.
27. *Патент* № 2211760 Российской Федерации, МПК B28D 5/00 (2006.01), B44C 1/22 (2006.01), C30B 31/00 (2006.01), C30B 33/00 (2006.01). Устройство для обработки алмазов : № 2001114961/03 : заявл. 31.05.2000 : опубл. 10.09.2003 / Турчин В.И., Радько В.Е.
28. *Manankov A.V.* Structural Organization of Innovative Petrosals from the Local Natural Raw Materials of the Polar Urals // Insights in Mining Science and Technology. 2020. V. 2. № 1. P. 153–161. DOI: 10.19080IMT.2020.02.555577
29. *Joye S.R.* The Pribram-Bohm hypothesis a topology of consciousness // Cosmos and History: The Journal of Natural and Social Philosophy. 2016. V. 12. № 2. P. 114–136.
30. *Aspect A., Grangier P., Roger G.* Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedanken experiment – A New Violation of Bell Inequalities // Physical Review Letters. 1982. V. 49. № 2. P. 91–94. PRL Bell ADR.
31. *Тэлбот М.* Голографическая Вселенная : пер. с англ. Москва : ИД «София», 2004. 368 с.
32. *Козырев Н.А.* Причинная или несимметричная механика в линейном приближении. Пулково, 1958. 41 с.
33. *Кузьмин А.М.* Периодическо-ритмические явления в минералогии и геологии. Томск : Изд-во СТТ, 2019. 336 с. ISBN 978-5-93629-631-4. EDN: XTBPPF
34. *Панин В.Е., Гринзев Ю.В., Данилов В.И., Зуев Л.В. и др.* Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск : Наука, 1990. 254 с. ISBN 5-02-029308-3. EDN: YSBSDP
35. *Попсулин С.* Русский ученый из Гарварда осуществил прорыв в пространстве квантового компьютера // Издание о высоких технологиях. 2012. 6 июля.
36. *Коржинский Д.С.* Теория метасоматической зональности. Москва : Наука, 1982. 104 с.
37. *Чепижный К.И.* Новое в минералогии (теория минералогии). Ленинград : Наука, 1988. 146 с.
38. *Мананков А.В.* Физико-химические основы наноструктурной минералогии в получении современных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 120–130. DOI: 10.21455/GB2018/2-7. EDN: OYATFR
39. *Свидетельство* № 92355 на товарный знак «СИКАМ» – новый 19 класс камней – искусственные, строительные и конструкционные строительные материалы неметаллические: приоритет 07.02.1990.
40. *Патент* № 2687014 Российской Федерации, МПК C03B 1/00 (2006.01). Способ приготовления метасиликатной ситалловой шихты : № 2018116526 : заявл. 03.05.2018 : опубл. 06.05.2019 / Мананков А.В., Владимиров В.М., Гасанова Э.Р. Бюл. № 13. 10 с.
41. *Loktyushin A.A., Manankov A.V.* Mineral structure in holographic model of substance // Структура и эволюция минерального мира. Сыктывкар, 1997. С. 35–37.
42. *Manankov A.V., Vladimirov V.M.* On the mechanism and thermodynamic modeling of metasilicate glass ceramics crystallization // Glass and ceramic. 2016. № 6 (June). P. 3–7. DOI: 10.1007/s10717-016-9856-1. EDN: WEFPFN
43. *Авторское свидетельство* № 1737965. Способ получения пористого остеклованного блока : заявл. 14.08.1989 : опубл. 15.01.1993 / Мананков А.В., Локтюшин А.А. Бюл. № 2.

44. Патент № 2525076 Российской Федерации, МПК C03B 19/08 (2006.01), C03C 11/00 (2006.01). Способ и устройство для изготовления пористого остеклованного блока : № 2013127553/03 : заявл. 17. 06.2013 : опубл. 10.08.2014 / Мананков А.В., Карапаш С.А. Бюл. № 22. 17 с.
45. Патент № 2582152 Российской Федерации, МПК C03B 19/08 (2006.01). Способ изготовления пористой стеклокерамики (варианты) : № 2015115361/03 : заявл. 23.04.2015 : опубл. 20.04.2016 / Мананков А.В. Бюл. № 11. 10 с.
46. Мананков А.В. Университетская наука в решении транспортных проблем страны // Проектирование, строительство, эксплуатация цементно-бетонных дорог: международный опыт и российская практика : материалы Международной конференции RUCEM, Москва, 24–25 сентября 2020 г. С. 56–58.
47. Мананков А.В., Быков Н.Е. Первоочередные научные идеи для Проекта Северного Широтного Хода и их технологическая проработка // Проектирование, строительство, эксплуатация цементно-бетонных дорог: международный опыт и российская практика : материалы Международной конференции RUCEM, Москва, 24–25 сентября 2020 г. С. 59–60.
48. Шубина Ю.С., Страхов Б.С., Мананков А.В. Геодинамика арктического шельфа и эманация метана из газогидратов // Материалы IX Всероссийской научной конференции с международным участием им. проф. М.К. Коровина. Томск : ТПУ, 2016. С. 10–19.
49. Павлушкин Н.М. Основы технологии ситаллов. Москва : Стройиздат, 1979. 340 с.
50. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. Москва : Наука, 1991. 271 с. ISBN 5-02-003505-X. EDN: KBQMGG

REFERENCES

1. Eitel W. The Physical Chemistry of the Silicates. Moscow: IL, 1968. 1055 p. (Russian translation)
2. Epelbaum M.V. Calculation of maximum rate crystallization temperature of glasses. *Steklo i keramika*. 1958; (4): 22–25. (In Russian)
3. Kirkpatrick R.J. Kinetics of Crystal Growth in the System CaMgSi₂O₆–CaAl₂SiO₆. *American Journal of Science*. 1974. 274 (3): 215–242.
4. Manankov A.V., Loktyushin A.A. Dynamic model of crystallization. In: *Proc. 2nd All-Russ. Conf. 'Physicochemical Modeling in Geochemistry and Petrology on a Computer'*. Irkutsk. 1988. P. 70. (In Russian)
5. Boroznovskaya N.N., Lesnov F.P., Manankov A.V. Influence of various forms of potassium manifestation on the luminescence of basic plagioclases. In: *Proc. 5th All-Union Symposium on the Problem of Isomorphism*. Saint-Petersburg: RMO, 1981. Pp. 44–47. (In Russian)
6. Manankov A.V., Loktyushin A.A., Baev S.Yu. Dynamics of the structure of F-aggregate color centers in crystals. In: *Proc. 6th All-Union Symposium on the Problem of Isomorphism*. Moscow: GEOKHI, 1988. P.135. (In Russian)
7. Manankov A.V., Loktyushin A.A., Baev S.Yu. Radiation sensitization of defects in crystals. In: *Proc. 6th All-Union Symposium on the Problem of Isomorphism*. Moscow: GEOKHI, 1988. P. 136. (In Russian)
8. Loktyushin A.A., Manankov A.V. Polarization Translation of Phase Transitions and Formation of Alkaline-Earth Element Metasilicates in Viscous Melts. *Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Sibiri*. 1990; (1): 16–22. (In Russian)
9. Sanina V.A., Golovenchits E.I. Polarization Interactions and Phase Transitions in Crystals with Two Interacting Subsystems. *Fizika tverdogo tela*. 2000; 42 (5): 905–909. (In Russian)
10. Manankov A.V. On the Liquation Mechanism in Silicate Systems. *DAN SSSR*. 1979; 246 (4): 942–946. (In Russian)
11. Romanov B.P., Manankov A.V., Golovko N.V. Investigation of Solid Solutions of the Clinohumite-Diopside System using Dilatometry and Electrical Conductivity Methods. *Neorganicheskie materialy*. 1985; 21 (9): 1539–1543. EDN: ZSBIJR (In Russian)
12. Manankov A.V., Sharapova V.N. Kinetics of Phase Transitions in Basic Melts and Magmas. Novosibirsk: Nauka, 1985. 199 p. (In Russian)
13. Manankov A.V., Yakovlev V.M. Unconventional Building Materials of the "Sikam" Class. *Stroitel'nye materialy*. 1995. (9): 16–17. (In Russian)

14. *Loktyushin A.A., Manankov A.V.* Spatially Closed Dynamic Structures. Tomsk: TSU, 1996. 121 p. (In Russian)
15. *Terletsky Ya.P.* Electrodynamics. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 129 p. (In Russian)
16. *Masterova M.A., Yants Yu.G.* Umov-Poynting vector of Dipole Electric and Dipole Magnetic Moments. Available: www.vestnik.adygnat.ru (In Russian)
17. *Zvezdin A.K., Matveev V.M., Mukhin A.A., Popov A.I.* Rare Earth Ions in Magnetically Ordered Crystals. Moscow: Nauka, 1985. 294 p. (In Russian)
18. *Manankov A.V.* Astromineralogy – A New Complex Science for Solving Raw Material and Environmental Problems of the Biosphere. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov*. 2016; (8): 204–211. (In Russian)
19. *Manankov A.V.* Native and Rare Earth Metals on the Earth, the Moon, in Tektites and Meteorites. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*. 2018; 17 (2): 111–130. (In Russian)
20. *Manankov A.V.* Theory of Formation and Forecast of Mineral Deposits. *Geosfernye issledovaniya*. 2019; (4): 83–94. (In Russian)
21. *Manankov A.V., Gasanova E.R., Kharitonova N.V.* Crystallochemical Foundations for Calculating the Monomineralism of Sitalls. *Neorganicheskie materialy*. 2018; 54 (9): 984–992. (In Russian)
22. *Manankov A.V., Gasanova E.R.* Glass-Ceramics from Local Raw Materials for Innovative Infrastructures with High Technical and Economic Efficiency in Extreme Far North Conditions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2018; 329 (11): 87–96. (In Russian)
23. *Manankov A.V., Gasanova E.R., Bykova V.V.* Physicochemical and Technological Aspects of New Class Glass-Ceramics Development. *Vestnik Voronezhskogo GUIT*. 2018; 80 (1): 211–222. (In Russian)
24. *Manankov A.V., Goryukhin E.Ya., Loktyushin A.A.* Wollastonite, Pyroxene and Other Materials from Industrial Waste and Abundant Natural Raw Materials. Tomsk: TSU, 2002. 168 p. (In Russian)
25. *Kipriyanov H.A., Gorichev N.G.* Electron-Proton Theory as a Fundamental Basis for Physicochemical Process of Oxide Minerals Leaching in Hydrometallurgy. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2006; 1 (12): 101–109. (In Russian)
26. *Konyukov K.V., Turchin V.I., Shumshurov A.V., Belyaev G.E., Kondrat'ev B.K., Turchin A.V.* “Combined Ion Source”. Patent Russ. Fed. No. 2003119003 A, 2005. (In Russian)
27. *Turchin V.I., Rad'ko V.E.* “Device for Diamond Processing”. Patent Russ. Fed. No. 2211760. 2003. (In Russian)
28. *Manankov A.V.* Structural Organization of Innovative Petrosals from the Local Natural Raw Materials of the Polar Urals. *Insights in Mining Science and Technology*. 2020; 2 (1): 153–161. DOI: 10.19080IMT.2020.02.555577
29. *Shelli R. Jove.* The Pribram-Bohm Hypothesis a Topology of Consciousness II Cosmos and History. *The Journal of Natural and Social Philosophy*. 2016; 12 (2): 114–136.
30. *Aspect A., Grangier P., Roger G.* Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedanken Experiment – A New Violation of Bell Inequalities. *Physical Review Letters*. 1982; 49 (2): 91–94. PRL Bell ADR.
31. *Talbot M.* The Holographic Universe. Moscow: Sofia, 2004. 368 p. (Russian translation)
32. *Kozyrev N.A.* Causal or Asymmetric Mechanics in the Linear Approximation. Pulkovo, 1958. 41 p. (In Russian)
33. *Kuzmin A.M.* Periodic-Rhythmic Phenomena in Mineralogy and Geology. Tomsk: STT, 2019. 336 p. (In Russian)
34. *Panin V.E., Grinzev Yu.V., Danilov V.I., Zuev L.V., et al.* Structural Levels of Plastic Deformation and Fracture. Novosibirsk: Nauka, 1990. 254 p. (In Russian)
35. *Popsulin S.* Russian Scientist from Harvard Made a Breakthrough in the Space of a Quantum Computer. *Izdatie o vysokikh tekhnologiyakh*. 2012. July 6. (In Russian)
36. *Korzhinsky D.S.* Theory of Metasomatic Zoning. Moscow: Nauka, 1982. 104 p. (In Russian)
37. *Chepizhny K.I.* News in Mineralogy (Theory of Mineralogy). Leningrad: Nauka, 1988. 146. p. (In Russian)
38. *Manankov A.V.* Physicochemical Foundations of Nanostructured Mineralogy in Modern Material Production. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; (2): 120–130. DOI: 10.21455/GPB2018/2-7 (In Russian)

39. Certificate No. 92355 for the trademark "SIKAM" - new 19th class of stones – artificial, building and structural non-metallic building materials, 1990. (In Russian)
40. *Manankov A.V., Vladimirov V.M., Gasanova E.R.* "Method for Preparing Metasilicate Glass-Ceramic Batch". Patent Russ. Fed. No. 2687014. 2018. 10 p. (In Russian)
41. *Loktyushin A.A., Manankov A.V.* Mineral Structure in Holographic model of Substance. Structure and Evolution of the Mineral World. Syktyvkar, 1997. Pp. 35–37.
42. *Manankov A.V., Vladimirov V.M.* Crystallization Mechanism and Thermodynamic Modeling of Metasilicate Glass Ceramics. *Glass and ceramics*. 2016; (6): 3–7. DOI: 10.1007/s10717-016-9856-1
43. *Manankov A.V., Loktyushin A.A.* "Production Method for Porous Vitrified Block". Author's Certificate No. 1737965. 1993. 17 p. (In Russian)
44. *Manankov A.V. Karaush S.A.* "Production Method and Device for Porous Vitrified Block". Patent Russ. Fed. No. 2525076. 2016. 17 p. (In Russian)
45. *Manankov A.V.* "Method for Manufacturing Porous Glass Ceramics (variants)". Patent Russ. Fed. No. 2582152. 2016. 10 p. (In Russian)
46. *Manankov A.V.* University science in solving the country's transport problems. In: *Proc Int. Sci. Conf. 'Design, Construction, and Operation of Cement-Concrete Roads: International Experience and Russian Practice'*. Moscow, September 24–25. 2020. Pp. 56–58. (In Russian)
47. *Manankov A.V., Bykov N.E.* Priority scientific ideas for the northern latitudinal passage project and their technological development. In: *Proc Int. Sci. Conf. 'Design, Construction, and Operation of Cement-Concrete Roads: International Experience and Russian Practice'*. Moscow, September 24–25. 2020. Pp. 59–60. (In Russian)
48. *Shubina Yu.S., Strakhov B.S., Manankov A.V.* Geodynamics of the arctic shelf and methane emanation from gas hydrates. In: *Proc. 9th All-Russ. Sci. Conf.* Tomsk: TPU, 2016. Pp. 10–19. (In Russian)
49. *Pavlushkin N.M.* Fundamentals of Sital Technology. Moscow: Stroyizdat, 1979. 340 p. (In Russian)
50. *Vernadsky V.I.* Scientific Thought as a Planetary Phenomenon. Moscow: Nauka. 1991. 271 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Мананков Анатолий Васильевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mav.39@mail.ru

Author Details

Anatoly V. Manankov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mav.39@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.09.2025
Одобрена после рецензирования 17.09.2025
Принята к публикации 17.09.2025

Submitted for publication 05.09.2025
Approved after review 17.09.2025
Accepted for publication 17.09.2025

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

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

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 227–241.

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 (6): 227–241.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.014.09.042

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-227-241

EDN: ICKCNM

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА НЕСУЩИХ БАЛОК ТРУБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ

Александр Аверьянович Алексеев¹,
Андрей Владимирович Картопольцев²

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

²ООО «ДИАМОС». г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. Сталежелезобетонные мосты с несущими балками из металлических труб являются эффективными для малых и средних пролетов. Повышение несущей способности за счет упругопластической работы сечения трубы отражает актуальность их применения в мостостроении.

Цель работы. Используя рациональность формы сечения балок и упругопластическое состояние, дополнить существующую модель расчета сталежелезобетонных сечений на воздействие сложных силовых факторов.

Результаты. Развитие методики расчета сталежелезобетонных комбинированных сечений с балками из металлических труб выявило изменения не только изгибной, но и изгибо-крутильной жесткости таких сечений в пролетных строениях и определило пути их оптимизации.

Ключевые слова: трубчатое сечение, пролетное строение, жесткость, нагрузка, коэффициент поперечной установки

Для цитирования: Алексеев А.А., Картопольцев А.В. Совершенствование расчета несущих балок трубчатого сечения пролетных строений металлических мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 227–241. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-227-241. EDN: ICKCNM

ORIGINAL ARTICLE

IMPROVEMENT OF LOAD-BEARING TUBULAR BEAM SECTION ANALYSIS OF BRIDGE SPANS

Aleksandr A. Alekseev¹, Andrei V. Kartopol'tsev²

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

²ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

Abstract. Steel-reinforced concrete bridges with load-bearing tubular beams are effective for small and medium spans. The increased load-bearing capacity due to the elastoplastic operation of the tubular beam section reflects the relevance of their application in the bridge construction.

Purpose: The aim is to improve the section analysis using rational shape of the beam section and elastoplastic state.

Research findings: The improved section analysis of steel concrete tubular beams shows changes not only in bending, but also bending-torsional stiffness of sections in superstructures and identifies ways for their optimization.

Keywords: tubular beam, superstructure, stiffness, load, transverse loading coefficient

For citation: Alekseev A.A., Kartopol'tsev A.V. Improvement of Load-Bearing Tubular Beam Section Analysis of Bridge Spans. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 227–241. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-227-241. EDN: ICKCNM

Известно, что в пространственных металлических конструкциях, какими являются пролетные строения мостов, подверженных воздействию многих сложных силовых факторов (сжатие и растяжение, изгиб и кручение одновременно), эффективными являются несущие трубчатого сечения балки, несущая способность которых определяется не столько количеством, площадью используемого материала, сколько рациональностью конструктивной формы поперечного сечения с точки зрения эффективности профиля, величиной упругости или упругопластического момента сопротивления W рассматриваемого элемента [1].

Несущие металлические балки трубчатого сечения зарекомендовали себя оптимально работающими на кручение с коэффициентом формы сечения K_x и K_y и минимальными коэффициентами конструктивных μ_k строительных ψ_c коэффициентов массы и коэффициентами восприимчивости трубчатых сечений к коррозии в 3...3,5 раза меньше, чем из балок открытого профиля поперечного сечения. Снижение эффективности применения несущих балок из труб за счет сравнительно небольшой изгибной жесткости компенсируется совершенствованием расчета и применением сводчатой железобетонной плиты проезжей части, повышающим изгибно-крутильную жесткость объединенного сечения с расчетной схемой, представленной на рис. 1 [2].

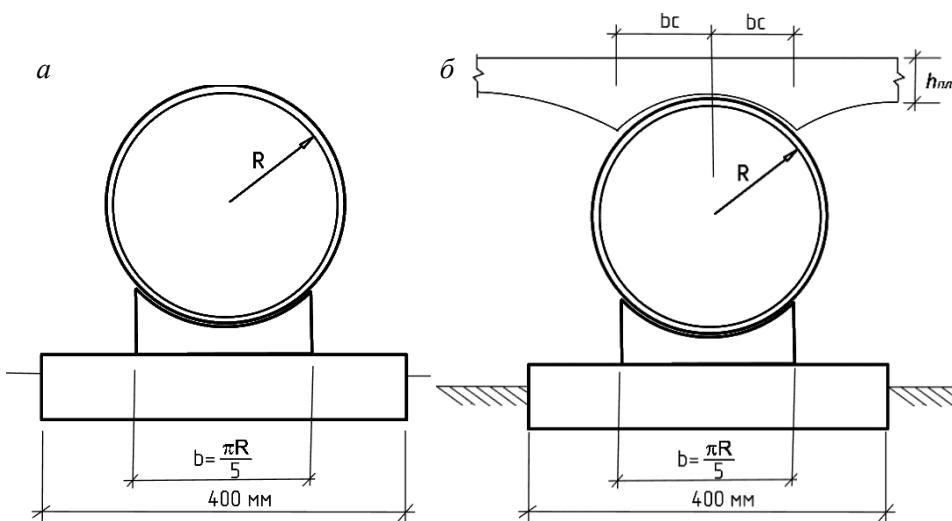


Рис. 1. Модель расчетной схемы объединенного сечения:

а – для стального пролетного строения из труб; б – сталежелезобетонного сечения

Fig. 1. Design model of combined section:

а – for steel concrete span; б – for steel concrete cross-section

Исходными условиями являются

$$\frac{2bc}{b} \leq 0,617 \frac{b}{h_{pl}} + 0,702,$$

где $2bc$ – отношение расчетной ширины железобетонной плиты проезжей части к количеству труб в сечении моста.

$$\frac{h_b}{l} = \left(\frac{1}{11} \dots \frac{1}{30} \right).$$

Изгибная жесткость балок соответствует изгибающему моменту M_u , равному

$$M_u = \frac{2\pi}{3} \tau_{xy} \cdot a^3 \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_{xy}}{G \cdot \theta \cdot R} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где a – редуцирующий коэффициент жесткости трубчатого сечения, который равен

$$a = 12,8 \frac{a^3 \cdot J_{tp}}{L_p^4 \cdot J_{pl}}. \quad (2)$$

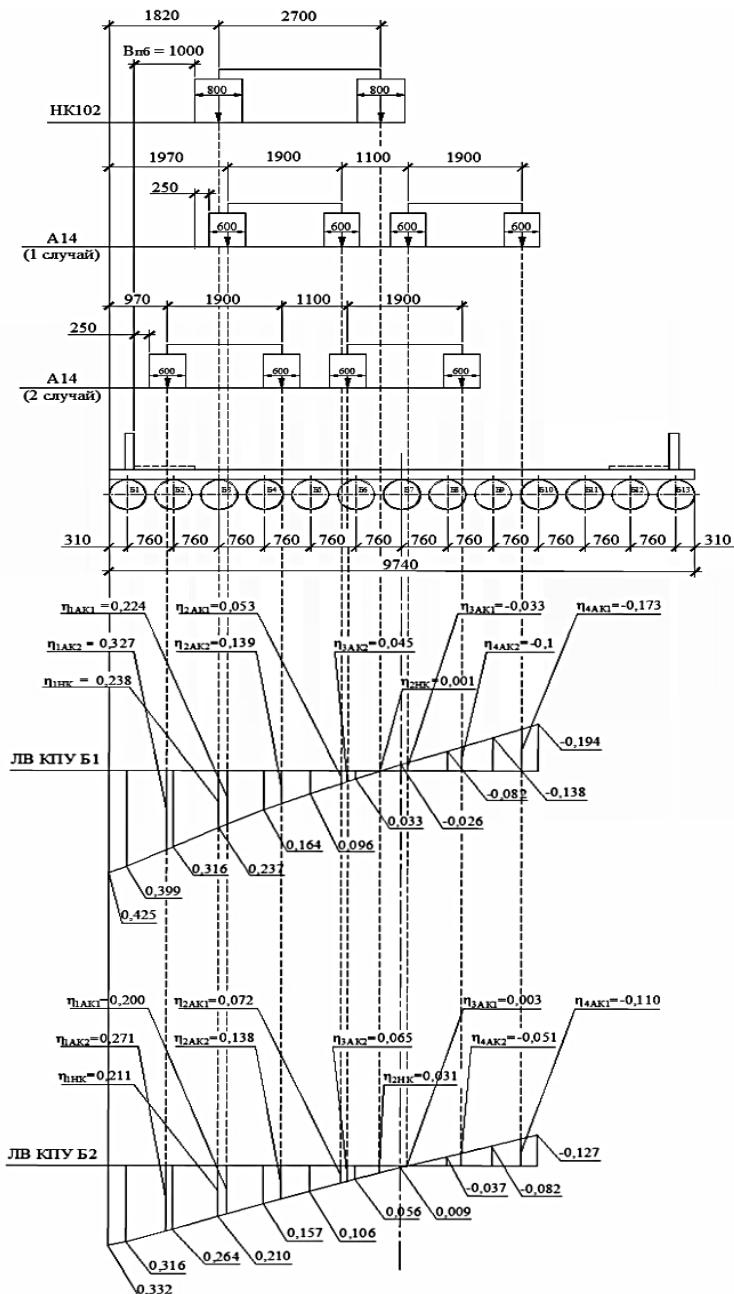
Например, для трубы $d = 620$ мм с толщиной стенки $t_s = 10$ мм, пролетом $L_p = 8,4$ м и толщиной плиты $h_{pl} = 120$ мм значение a равно

$$a = 12,8 \frac{0,76^3}{8,4^4} \frac{0,0036^4}{0,003796^4} = 0,0017.$$

Коэффициент жесткости a является основным параметром при определении коэффициента поперечной установки (КПУ) и загружения линий влияния

по методу В.С. Осипова для наиболее нагруженных в поперечном сечении балок (рис. 2) [3]. Знаменатель при определении реакции в линиях влияния для балок вычисляется по следующей формуле:

$$D = 540 + 48 \cdot 312a + 588 \cdot 330a^2 + 1 \cdot 856 \cdot 808a^3 + 205 \cdot 202a^4 = 592,37. \quad (3)$$



Вестник ТГАСУ. 2025. Т. 27. № 6

Рис. 2. Линии влияния КПУ методом упругих опор
Fig. 2. Influence of transverse loading coefficient determined by the method of elastic supports

Ординаты линии влияния для крайней главной балки № 1 равны следующим значениям:

$$\begin{aligned}
 R_{00} &= 1/D(204 + 29784a + 450942a^2 + 1597864a^3 + 1886810a^4) = \\
 &= 0,002(204 + 31,869 + 0,516 + 0,002 + 0,000) = 0,399; \\
 R_{01} &= 1/D(168 + 17982a + 189036a^2 + 440683a^3 + 320694a^4) = \\
 &= 0,002(168 + 19,241 + 0,216 + 0,0005 + 0,000) = 0,316; \\
 R_{02} &= 1/D(132 + 8028a + 20316a^2 - 81206a^3 - 132621a^4) = \\
 &= 0,002(132 + 8,59 + 0,024 - 0,0001 - 0,000) = 0,237; \\
 R_{03} &= 1/D(96 + 966a - 41988a^2 - 108971a^3 - 41410a^4) = \\
 &= 0,002(96 + 1,034 - 0,048 - 0,0001 - 0,000) = 0,164; \\
 R_{04} &= 1/D(60 - 2952a - 35706a^2 - 12092a^3 + 18804a^4) = \\
 &= 0,002(60 - 3,159 - 0,041 - 0,00001 + 0,000) = 0,096; \\
 R_{05} &= 1/D(24 - 4050a - 7608a^2 + 23293a^3 + 1770a^4) = \\
 &= 0,002(24 - 4,334 - 0,009 + 0,00003 + 0,0) = 0,033; \\
 R_{06} &= 1/D(-12 - 3012a + 10428a^2 + 3466a^3 - 4717a^4) = \\
 &= 0,002(-12 - 3,223 + 0,012 + 0,000004 - 0,0) = -0,026; \\
 R_{07} &= 1/D(-48 - 666a + 8688a^2 - 9581a^3 + 2592a^4) = \\
 &= 0,002(-48 - 0,713 + 0,01 - 0,00001 + 0,000) = -0,082; \\
 R_{08} &= 0,002/D(-84 + 2232a - 5778a^2 + 3352a^3 - 630a^4) = \\
 &= 0,001(-84 + 2,388 - 0,007 + 0,000004 - 0,000) = -0,138.
 \end{aligned}$$

Ординаты линии влияния для главной балки № 2 равны следующим значениям:

$$\begin{aligned}
 R_{10} &= 1/D(168 + 17982a + 189036a^2 + 440683a^3 + 320694a^4) = \\
 &= 0,002(168 + 19,241 + 0,216 + 0,0005 + 0,000) = 0,316; \\
 R_{11} &= 1/D(141 + 14160a + 204576a^2 + 867556a^3 + 1268879a^4) = \\
 &= 0,002(141 + 15,151 + 0,234 + 0,001 + 0,000) = 0,264; \\
 R_{12} &= 1/D(114 + 9729a + 146376a^2 + 543967a^3 + 562308a^4) = \\
 &= 0,002(114 + 10,410 + 0,168 + 0,0007 + 0,000) = 0,21; \\
 R_{13} &= 1/D(87 + 5562a + 67575a^2 + 108094a^3 - 40914a^4) = \\
 &= 0,002(87 + 5,951 + 0,077 + 0,0001 - 0,000) = 0,157;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{14} &= 1/D(60 + 2388a + 10986a^2 - 71210a^3 - 77302a^4) = \\
&= 0,002(60 + 2,555 + 0,013 - 0,0001 - 0,000) = 0,106; \\
R_{15} &= 1/D(33 + 414a - 14943a^2 + 52754a^3 + 11496a^4) = \\
&= 0,002(33 + 0,443 - 0,017 - 0,00006 + 0,000) = 0,056; \\
R_{16} &= 1/D(33 + 414a - 14943a^2 - 52754a^3 + 11496a^4) = \\
&= 0,002(6 - 0,549 - 0,02 + 0,00001 + 0,000) = 0,009; \\
R_{17} &= 1/D(-21 - 744a - 6672a^2 + 21976a^3 - 9793a^4) = \\
&= 0,002(-21 - 0,796 - 0,008 + 0,00003 - 0,000) = -0,037; \\
R_{18} &= 1/D(-48 - 666a + 8688a^2 - 9581a^3 + 2592a^4) = \\
&= 0,002(-48 - 0,713 + 0,01 - 0,00001 + 0,000) = -0,082.
\end{aligned}$$

Коэффициенты поперечной установки для метода упругих опор вычисляются по формуле

$$КПУ = \frac{\eta_1 + \mu_2}{2} + 0,6 \frac{\eta_3 + \mu_4}{2}. \quad (4)$$

Коэффициенты поперечной установки от двух полос нагрузки А14 равны следующим значениям:

– для балки Б1:

$$КПУ_{A1B1} = \frac{0,224 + 0,053}{2} + 0,6 \frac{0,033 + 0,173}{2} = 0,077;$$

– для балки Б2:

$$КПУ_{A1B2} = \frac{0,2 + 0,072}{2} + 0,6 \frac{0,003 - 0,110}{2} = 0,104.$$

Коэффициенты поперечной установки от двух полос нагрузки А14 соответственно равны:

– для балки Б1:

$$КПУ_{A2B1} = \frac{0,327 + 0,139}{2} + 0,6 \frac{0,045 - 0,100}{2} = 0,217;$$

– для балки Б2:

$$КПУ_{A2B2} = \frac{0,271 + 0,138}{2} + 0,6 \frac{0,065 - 0,051}{2} = 0,209.$$

Коэффициенты поперечной установки от нагрузки НК14 равны:

– для балки Б1:

$$КПУ_{HKB1} = \frac{0,238 + 0,001}{2} = 0,12;$$

– для балки Б2:

$$КПУ_{HKB2} = \frac{0,211 + 0,031}{2} = 0,121.$$

Линия влияния изгибающего момента посередине пролета балки и положение нагрузки, соответствующее M_{\max} , приведены для нагрузки АК на рис. 3, а для нагрузки НК – на рис. 4.

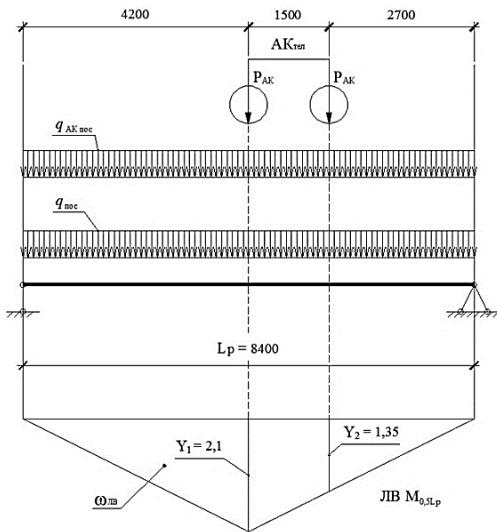


Рис. 3. Схема нагрузки АК вдоль моста
Fig. 3. Load diagram along the bridge

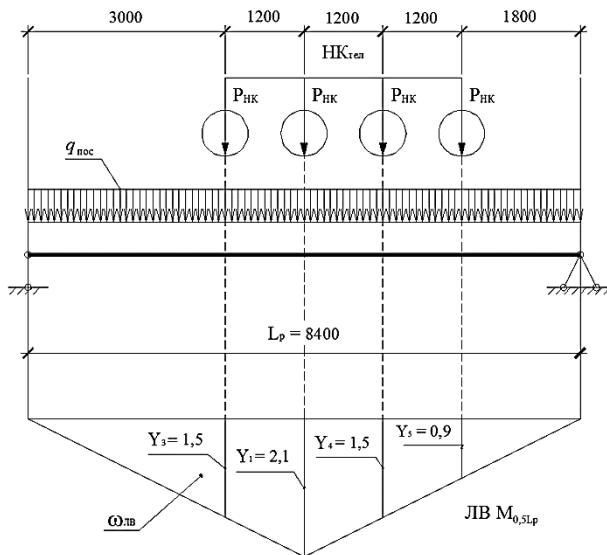


Рис. 4. Схема нагрузки НК вдоль моста
Fig. 4. Load diagram along the bridge

Площадь линии влияния изгибающего момента посередине пролета равна

$$\omega_M = 0,125 \cdot L_p^2 = 0,125 \cdot 8,4^2 = 8,82 \text{ усл. ед.} \quad (5)$$

Ординаты линии влияния от тележки нагрузки А14:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= \frac{L_p}{4} = \frac{8,4}{4} = 2,1; \\ Y_2 &= Y_1 \frac{0,5 \cdot L_p - 1,5}{0,5 \cdot L_p} = 2,1 \frac{0,5 \cdot 8,4 - 1,5}{0,5 \cdot 8,4} = 1,35. \end{aligned} \right\}$$

Ординаты линии влияния от НК102:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 2,1; \\ Y_3 = Y_4 &= Y_1 \frac{0,5 \cdot L_p - 1,2}{0,5 \cdot L_p} = 2,1 \frac{0,5 \cdot 8,4 - 1,2}{0,5 \cdot 8,4} = 1,5; \\ Y_5 &= Y_1 \frac{0,5 \cdot L_p - 12,4}{0,5 \cdot L_p} = 2,1 \frac{0,5 \cdot 8,4 - 2,4}{0,5 \cdot 8,4} = 0,9. \end{aligned} \right\}$$

Принимаем коэффициенты надежности для временных нагрузок равными: для тележки нагрузки АК – $\gamma_{fAK_t} = 1,5$; для полосовой нагрузки АК – $\gamma_{fAK_p} = 1,15$; для нагрузки НК – $\gamma_{fHK} = 1,1$.

Принимаем динамические коэффициенты равными для тележки нагрузки АК – $(1 + \mu)_{AK_t} = 1,4$; для полосовой нагрузки АК – $(1 + \mu)_{AK_p} = 1,0$; для нагрузки НК – $(1 + \mu)_{HK} = 1,0$.

Значения временных нагрузок для нагрузок класса К = 14: осевая нагрузка тележки АК – $P_{AK} = 10 \cdot K = 10 \cdot 14 = 140$ кН; интенсивность полосовой нагрузки АК – $v_{AK} = K = 14$ кН/м; осевая нагрузка тележки НК – $P_{HK} = 18 \cdot K = 18 \cdot 14 = 252$ кН;

Тогда нормативные изгибающие моменты будут равны следующим значениям:

$$\left. \begin{aligned} &\text{– для нагрузки АК:} \\ &M_h^{AK} = q_c \cdot \omega_M + КПУ_{AK} (P_{AK} (Y_1 + Y_2) + v_{AK} \cdot \omega_M); \\ &\text{– для нагрузки НК:} \\ &M_h^{HK} = q_c \cdot \omega_M + КПУ_{HK} (P_{HK} (Y_1 + Y_3 + Y_4 + Y_5)). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Расчетные изгибающие моменты равны следующим значениям:

$$\left. \begin{aligned} &\text{– для нагрузки АК:} \\ &M_p^{AK} = \gamma_{fAK_t} \cdot q_c \cdot \omega_M + КПУ_{AK} \times \\ &\times (\gamma_{fAK_t} (1 + \mu)_{AK_t} P_{AK} (Y_1 + Y_2) + \gamma_{fAK_p} (1 + \mu)_{AK_p} v_{AK} \cdot \omega_M); \\ &\text{– для нагрузки НК:} \\ &M_p^{HK} = \gamma_{fHK} \cdot q_c \cdot \omega_M + КПУ_{HK} (\gamma_{fHK} (1 + \mu)_{HK} P_{HK} (Y_1 + Y_3 + Y_4 + Y_5)). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Вычисления изгибающих моментов для наиболее нагруженных первых двух балок Б1, Б2 приведены в таблице.

Расчетные данные
Calculated data

Значения	Нагрузка от собственного веса q , кН/м	Схемы нагружения				
		Б1 (А14)		Б2 (А14)		(НК102)
		Тележка АК, P_{AK} , кН	Полосовая АК, v_{AK} , кН/м пог.	Тележка АК, P_{AK} , кН	Полосовая АК, v_{AK} , кН/м пог.	P_{HK} , кН
Нормативные значения						
Параметры нагрузок	5,3	140	14	140	14	252
$\sum y_i$, м		3,45	—	3,45	—	6
$\sum \omega_i$, м ²	8,82	—	8,82	—	8,82	—
η	—	0,077	0,077	0,217	0,217	0,12
M_h , кН·м	46,75	37,19	9,51	104,81	26,8	181,44
$\sum M_h$, кН·м	46,75		46,7		131,61	181,44
$\sum M_{\text{общ}}$, кН·м			93,45		178,36	228,19
γ_f		1,5	1,15	1,5	1,15	1,1
$(1+\mu)$		1,4	1	1,4	1	1
Расчетные значения						
Параметры нагрузок	6,08	294	16,1	294	16,1	277,2
M_p , кН·м	53,63	78,1	10,93	220,1	30,81	199,58
$\sum M_p$, кН·м	53,63		89,03		250,91	199,58
$\sum M_{\text{общ}}$, кН·м			142,66		304,54	253,21

Из данных таблицы следует, что максимальный изгибающий момент наблюдается в балке Б2 от нагрузки А14, равен $M_{\max} = 341,16$ кН·м и свидетельствует о проявлении клавишного эффекта.

Рассмотрим расчетную схему для определения геометрических характеристик (рис. 5, 6).

Коэффициент приведения характеристик бетона к стали:

$$n = \frac{E_s}{E_b},$$

где $E_s = 206\,000$ МПа – модуль упругости стали; $E_b = 32\,500$ МПа – модуль упругости бетона марки В30 [4],

$$n = \frac{206000}{32500} = 6,34.$$

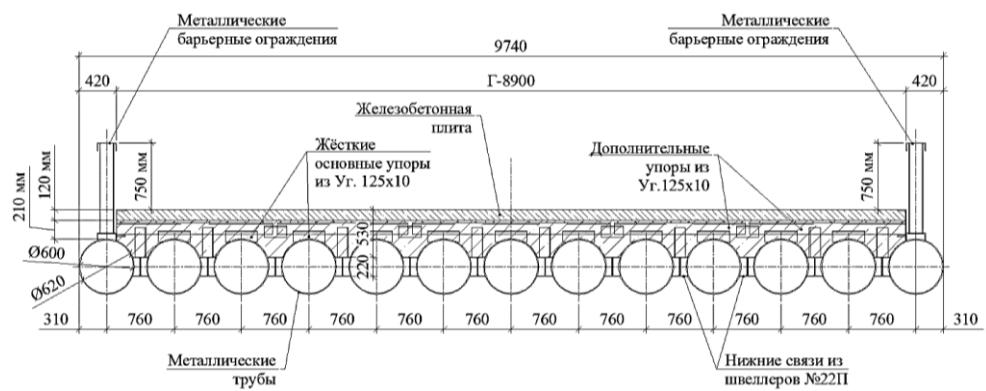


Рис. 5. Поперечное сечение моста из металлических труб с габаритом Г-8,9 м
Fig. 5. Cross-section of bridge made of metal tubes 8.9 m in size

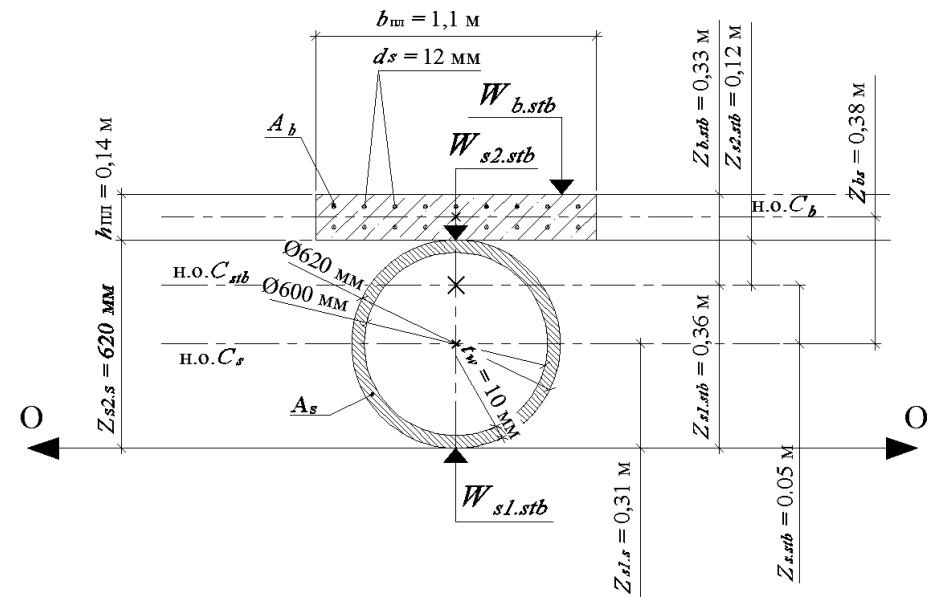


Рис. 6. Схема расчета геометрических характеристик сталежелезобетонного пролетного строения
Fig. 6. Design scheme for geometrical parameters of steel concrete span

Площадь сечения стальной трубы $D = 620$ мм с толщиной стенки $t_w = 10$ мм.

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4};$$

$$A_s = 3,14 \cdot 0,622/4 - 3,14 \cdot 0,62/4 = 0,0192 \text{ м}^2.$$

Площадь сечения бетона плиты проезжей части равна

$$A_b = b_{\text{пл}} \cdot h_{\text{пл}};$$

$$A_b = 1,1 \cdot 0,14 = 0,154 \text{ м}^2.$$

Площадь арматурных стержней в железобетонной плите.

Принимаем армирование двумя сетками из арматуры диаметром $d_s = 0,012$ м с размерами ячеек 120×120 мм. На участке плиты длиной 1,1 м разместится при этом $n_r = 2 \frac{1,1}{0,12} \approx 18$ шт. стержней арматуры.

$$A_r = n_r \frac{\pi d_s^2}{4};$$

$$A_r = 18 \cdot 3,14 \cdot 0,0122/4 = 0,0020 \text{ м}^2.$$

Площадь железобетонной плиты A_{bs} :

$$A_{bs} = A_b + \frac{A_r}{n};$$

$$A_{bs} = 0,154 + 0,0020/6,34 = 0,1543 \text{ м}^2.$$

Площадь сталежелезобетонного сечения A_{stb} :

$$A_{stb} = A_s + A_{bs};$$

$$A_{stb} = 0,0192 + 0,1543 = 0,1735 \text{ м}^2.$$

Положение нейтральной оси стальной трубы:

$$Z_{s1,s} = D/2;$$

$$Z_{s1,s} = 0,62/2 = 0,31 \text{ м.}$$

Статический момент стальной трубы S_s относительно собственной нейтральной оси $Z_{s1,s}$:

$$S_s = A_s \cdot z_{s1,s};$$

$$S_s = 0,0192 \cdot 0,31 = 0,006 \text{ м}^3.$$

Статический момент сталежелезобетонного сечения (S_{stb}) относительно нейтральной оси стального сечения (н. о. C_s):

$$S_{stb} = \frac{1}{n} A_{bs} \cdot Z_{bs};$$

$$S_{stb} = 0,1543 \cdot 0,38/6,34 = 0,0093 \text{ м}^3.$$

Расстояние $Z_{s,stb}$ между н. о. стальной трубы (s) и н. о. сталежелезобетонного сечения (stb):

$$Z_{s,stb} = \frac{S_{stb}}{A_{stb}};$$

$$Z_{s,stb} = 0,0093/0,1735 = 0,0536 \text{ м.}$$

Момент инерции стальной трубы J_s относительно собственной нейтральной оси н. о. (C_s):

$$J_s = \frac{\pi D^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64};$$

$$J_s = 3,14 \cdot 0,624/64 - 3,14 \cdot 0,64/64 = 0,0008 \text{ м}^4.$$

Момент инерции железобетонной плиты J_{bs} относительно собственной нейтральной оси (н. о. C_b):

$$J_{bs} = \frac{b_{пл} \cdot h_{пл}^3}{12} + 18 \frac{\pi \cdot d_s^4}{64} + A_r (h_{пл} - z_{s,стb})^2;$$

$$J_{bs} = 1,1 \cdot 0,143/12 + 18 \cdot 3,14 \cdot 0,0124/64 + 0,002(0,14 - 0,05)2 = 0,0003 \text{ м}^4.$$

Момент инерции $J_{стb}$ сталежелезобетонного сечения относительно собственной нейтральной оси (н. о. stb):

$$J_{стb} = J_s + A_s \cdot Z_{s,стb}^2 + \frac{J_{bs}}{n} + \frac{A_{bs}}{n} (Z_{b,s} - Z_{s,стb})^2;$$

$$J_{стb} = 0,0008 + 0,0192 \cdot 0,052 + 0,0003/6,34 + \\ + 0,1543/6,34(0,38 - 0,05)2 = 0,0008 + 0,00005 + 0,00005 + 0,0027 = 0,0036 \text{ м}^4.$$

Момент сопротивления $W_{b,стb}$:

$$Z_{b,стb} = Z_{bs} - z_{s,стb} = 0,38 - 0,05 = 0,33 \text{ м};$$

$$W_{b,стb} = \frac{J_{стb}}{Z_{b,стb}};$$

$$W_{b,стb} = 0,0036/0,33 = 0,011 \text{ м}^3.$$

Момент сопротивления $W_{s1,стb}$ крайней фибры низа трубы:

$$W_{s1,стb} = \frac{J_{стb}}{Z_{s1,стb}};$$

$$W_{s1,стb} = 0,0036/0,36 = 0,01 \text{ м}^3.$$

Момент сопротивления $W_{s2,стb}$ крайней фибры верха трубы:

$$W_{s2,стb} = \frac{J_{стb}}{Z_{s2,стb}};$$

$$W_{s2,стb} = 0,0036/0,12 = 0,03 \text{ м}^3.$$

Коэффициент тонкостенности трубы равен

$$k = b = \frac{d}{D} = \frac{600}{620} = 0,97.$$

При расчетном сопротивлении стали трубы $R_n = 200 \text{ МПа}$; $\sigma_t = 195 \text{ МПа}$.

$$\text{Значение } \cos \varphi = \frac{Z_{s,стb}}{d} = \frac{0,05}{0,6} = 0,083; \cos \varphi = 0,99.$$

Определим расчетный коэффициент удельного веса трубы [5]:

$$(R_n - \sigma_t) = \lambda \cdot \sigma_t (b \cdot \gamma \cos \varphi - 1); \quad (8)$$

$$\frac{(R_n - \sigma_t)}{\lambda \cdot \sigma_t} = (b \cdot \gamma \cos \varphi - 1); \quad (9)$$

$$\frac{200 - 195}{1 \cdot 195} = (0,97 \cdot \gamma \cdot 0,99 - 1);$$

$$\begin{aligned}
 0,025 &= 0,96\gamma - 1; \\
 -0,96\gamma &= -0,025 - 1; \\
 \gamma &= \frac{-1,025}{-0,96} = 1,07; \\
 A &= \arccos \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma^2} - 1 \right) \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \\
 &= \arccos \frac{1}{1,07} - \frac{1}{1,07} \left(\frac{2}{1,07^2} - 1 \right) \sqrt{1 - \frac{1}{1,07^2}} = 0,76.
 \end{aligned}$$

Определим параметр B по формуле

$$B = \left(1 - \frac{1}{\gamma^2} \right)^{3/2} = \left(1 - \frac{1}{1,07^2} \right)^{3/2} = 0,046.$$

Для упругопластического состояния сечения трубы значение параметра β равно

$$\begin{aligned}
 \beta &= \gamma - \frac{2\lambda}{\pi(1-b^4)} \left(\gamma \cdot A - \frac{8}{3} B \right) = \\
 &= 1,07 - \frac{2 \cdot 1}{3,14(1-0,97^4)} \left(1,07 \cdot 0,76 - \frac{8}{3} 0,046 \right) = 2,76.
 \end{aligned}$$

Запишем условие

$$\frac{M_{\text{внеш}}}{M_{\text{трубы}}} = 2,76,$$

тогда

$$\frac{253,21 \text{ кН} \cdot \text{м}}{M_{\text{трубы}}} = 2,76;$$

$$M_{\text{трубы}} = \frac{253,21}{2,76} = 91,74 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Изгибающий момент, воспринимаемый железобетонной плитой проезжей части, равен

$$M_{\text{ж/б}} = 86830 \text{ кг} \cdot \text{см} = 86830 \frac{9,81}{100000} = 8,52 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

тогда

$$M_{\text{трубы}}^{\text{несущ}} = M_{\text{трубы}}^{\text{чист}} + M_{\text{ж/б}} = 141,97 + 8,52 = 150,49 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

При расчетном сопротивлении плиты железобетонной части $R_b = 160 \text{ кг}/\text{см}^2$ изгибающий момент плиты равен

$$\begin{aligned}
 M_{\text{ж/б}} &= (160 \text{ см}/\text{см}^2 \cdot J_{\text{ст}})/33 \text{ см} = 160 \text{ см}/\text{см}^2 \cdot 360\,000 \text{ см}^4/33 \text{ см} = \\
 &= 1\,745\,454,54 \text{ кг} \cdot \text{см} = 171,23 \text{ кН} \cdot \text{м}.
 \end{aligned}$$

Изгибающий момент металлической трубы будет равен

$$M_{\text{трубы}} = (1950 \text{ см}/\text{см}^2 \cdot J_{\text{ст}})/31 \text{ см} = 1950 \text{ см}/\text{см}^2 \cdot 360\,000 \text{ см}^4/31 \text{ см} = \\ = 22\,645\,161,29 \text{ кг}\cdot\text{см} = 2221,49 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Изгибающий момент сталежелезобетонного сечения:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{ж/б}} + M_{\text{ср}} = 171,23 + 2221,49 = 2392,72 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M_{\text{I+II}}^n = 83,97 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Проверяем условие прочности на внешней фибре кольцевого сечения трубы по формуле

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\text{ст}} - Z_{bs} \cdot N_{b2s}}{\eta \cdot W_{s2\text{ст}} - \frac{N_{b2s}}{A_s}} \leq m \cdot m_l \cdot R_y, \quad (10)$$

где η – коэффициент для кольцевого сечения, равен 1,15 [6]; N_{b2s} – продольная сила на уровне ц. т. плиты, равна 2832,2 кН; $m = 0,9$; $m_l = 0,75$; $R_y = 200\,000 \text{ кН}/\text{м}^2$.

Расчетное значение $\sigma_{s2} = 126\,000 \text{ кН}/\text{м}^2 < 135\,000 \text{ кН}/\text{м}^2$ – условие прочности выполняется с запасом 6,7 %.

Выводы

Совершенствование расчета несущих балок пролетных строений мостов из металлических труб, объединенных для совместной работы с железобетонной плитой проезжей части, показало дополнительные резервы прочности за счет упругопластической работы сечения трубы, а также необходимость рассмотрения влияния клавишного эффекта при расчетах КПУ методом упругих опор.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петрова Г.В. Применение пролетных строений из труб на мостах средней длины // Избранные доклады II Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2015)», Томск, 16–20 ноября 2015 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. С. 323–326. EDN: VZRKBF
2. Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л. Прогрессивные материалы и конструктивные формы в металлических мостах. Ленинград, 1988. 101 с.
3. Петрова Г.В., Картопольцев В.М. К расчету пролетных строений сталежелезобетонных мостов из труб методом упругих опор // Избранные доклады 63-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых учёных, Томск, 20 апреля 2017 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. С. 206–208. EDN: YQHCHK
4. Алексеев А.А., Чернышов А.И., Киряков Е.И., Глотов С.А. Влияние электризованной поверхности минерального вяжущего на процессы гидратации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 134–143.
5. Hainc S.P. LED-criteria for composite steel I-beams bridges // J. Struct Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Enq. 1980. V. 11. P. 2297–2312.
6. Лейбензон Л.С. Курс теории упругости. Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1947. 464 с.

REFERENCES

1. Petrova G.V. The use of tubular beam spans on medium-length bridges. In: Proc. Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Youth, Science, Technology: New Ideas and Prospects'. Tomsk. 2015, Pp. 323–326. EDN: VZRKBF (In Russian)

2. Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shaikevich V.L. Progressive materials and structural forms in metal bridges. Leningrad, 1988. 101 p. (In Russian)
3. Petrova G.V., Kartopol'tsev V.M. Section analysis of tubular beams of bridge spans using elastic support method. In: Proc. 63rd Sci. Conf. of Students of Young Scientists. Tomsk, 2017. Pp. 219–221. EDN: YQHCHK (In Russian)
4. Alekseev A.A., Chernyshov A.I., Kiryakov E.I., Glotov S.A. The Influence of Surface Electrization of Cementitious Material on Hydration Processes. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; (6): 134–143. (In Russian)
5. Heins C.P. LED Criteria for Composite Steel I-Beam Bridges. *Journal of the Structural Division*. 1980; 106 (11): 2297–2312.
6. Leibenzon L.S. The Course of Elasticity Theory. Moscow, Leningrad, 1947. 464 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alekseev10@yandex.ru

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Authors Details

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru

Audrei V. Kartopol'tsev, 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 15.05.2025
Одобрена после рецензирования 27.05.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 15.05.2025
Approved after review 27.05.2025
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 242–256.

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 (6): 242–256.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.768.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-242-256

EDN: FKJNAL

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОПАНЕЛЬНЫХ И ДВУХПАНЕЛЬНЫХ СНЕГОЗАДЕРЖИВАЮЩИХ ЗАБОРОВ ВО ВРЕМЯ МЕТЕЛЕЙ

**Ольга Вадимовна Гладышева, Наталья Юрьевна Алимова,
Евгения Александровна Бончева, Екатерина Валерьевна Миронова**
Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж, Россия

Аннотация. Актуальность. В статье рассматривается работа снегозадерживающих заборов из сеток на полимерной основе во время метели. На данный момент в нормативной литературе отсутствуют рекомендации по проектированию таких сооружений, поэтому исследование снегозадерживающей способности заборов из сеток на полимерной основе является актуальной задачей.

Цель. Обоснование целесообразности применения снегозадерживающих заборов из сеток на полимерной основе для защиты автомобильных дорог от снега во время метелей.

Методы. Моделирование работы конструкций при метелях выполнено в программе FlowVision на основе решения системы уравнений вычислительной гидродинамики Навье – Стокса.

Результаты. Созданы геометрические модели однопанельного и двухпанельного снегозадерживающих заборов. Исследована динамика отложения снега у снегозадерживающего решетчатого препятствия. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования распределения снежных масс перед препятствиями и за ними. Выполнена оценка снегосборной способности рассматриваемых снегозадерживающих заборов.

Выводы. На основе полученных результатов моделирования было установлено, что снегосборная способность двухпанельного забора исследуемой конструкции незначительно уступает однопанельному. При этом зона снежных отложений располагается ближе к препятствию, но непосредственно у самого препятствия снежный вал будет формироваться на большем расстоянии. Следовательно, применение двухпанельных снегозадерживающих заборов рассматриваемой конструкции обосновано в качестве снегозащиты автомобильных дорог.

Ключевые слова: автомобильная дорога, зимнее содержание дорог, снегозадерживающие заборы, снеговетровой поток, моделирование

Для цитирования: Гладышева О.В., Алимова Н.Ю., Бончева Е.А., Миронова Е.В. Моделирование работы однопанельных и двухпанельных снегозадерживающих заборов во время метелей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 242–256. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-242-256. EDN: FKJNAL

ORIGINAL ARTICLE

MODELING OF SINGLE- AND DOUBLE-PANEL WALLS AGAINST SNOWDRIFTS

Olga V. Gladysheva, Natalia Y. Alimova,
Evgenia A. Boncheva, Ekaterina V. Mironova
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The article describes of the polymer mesh snow walls against snowdrifts. There are no recommendations for the design of such structures in the literature. Therefore, the study of the snowdrift capacity of polymer mesh snow walls is relevant.

Purpose: Justification of using polymer mesh snow walls to protect roads from snowdrifts.

Methodology/approach: The simulation of snow wall operation during snowdrift is performed in FlowVision using Navier–Stokes equations for computational fluid dynamics. Geometric models are created for single- and double-panel walls. Snow deposition dynamics near the wall protection is studied. The snowdrift capacity is evaluated for protective walls.

Research findings: The snowdrift capacity of proposed design of the double-panel wall is slightly less than that of the single-panel wall. The snow accumulation area locates closer to the wall, but the snowdrift forms at a greater distance near the obstacle. Therefore, the double-panel snow wall can be used for the road protection from snow.

Keywords: road, winter road maintenance, snow wall, snow-wind stream, modeling

For citation: Gladysheva O.V., Alimova N.Yu., Boncheva E.A., Mironova E.V. Modeling of Single- and Double-Panel Walls against Snowdrifts. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 242–256. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-242-256. EDN: FKJNAL

Введение

В зимний период на большей части территории России происходят переносы снега, вызывающие снежные заносы на автомобильных дорогах. Защита снегозаносимых участков с помощью снегозащитных сооружений является одной из главных задач зимнего содержания дорог [1].

Основным показателем работы снегозащитных сооружений является количество задерживаемого ими снега. Эффективность снегозащиты зависит от правильного выбора типа конструкции, расстояния линии защиты от бровки земляного полотна автомобильной дороги, учета рельефа местности и других местных условий [2–5].

Выпадение снега у преград происходит при любом, даже незначительном снижении скорости снеговетрового потока, причем наибольшее количество снега выпадает при первоначальном снижении скорости [6, 7]. Таким образом, величина снегосборной способности снегозащитных сооружений зависит от протяженности зоны пониженных скоростей снеговетрового потока.

Для защиты автомобильных дорог от снега часто используются снегозадерживающие заборы, которые представляют собой деревянные конструкции. В настоящее время большой интерес для конструирования снегозащитных сооружений представляют полимерные сетки, которые возможно использовать для проектирования постоянной снегозащиты [8, 9]. Но в нормативной лите-

туре отсутствуют рекомендации по проектированию таких сооружений, поэтому исследование снегозадерживающей способности заборов из сеток на полимерной основе является актуальной задачей.

Проведено исследование снегозадерживающей способности заборов из сеток на полимерной основе с помощью моделирования работы различных конструкций снегозащиты во время метели.

Физическая постановка задачи

Как показали исследования, процессы переноса и выпадения снега из снеговетрового потока зависят от скорости ветра [5–7]. При этом масса переносимого снега уменьшается пропорционально изменению скорости:

$$\left(\frac{V_n}{V_\pi} \right)^n, \quad (1)$$

где V_n – начальная скорость снеговетрового потока; V_π – изменившаяся, уменьшенная скорость снеговетрового потока; n – показатель степени – по данным различных исследователей, колеблется от 2 до 5.

Динамика отложения снега у снегозадерживающего решетчатого препятствия приведена на рис. 1.

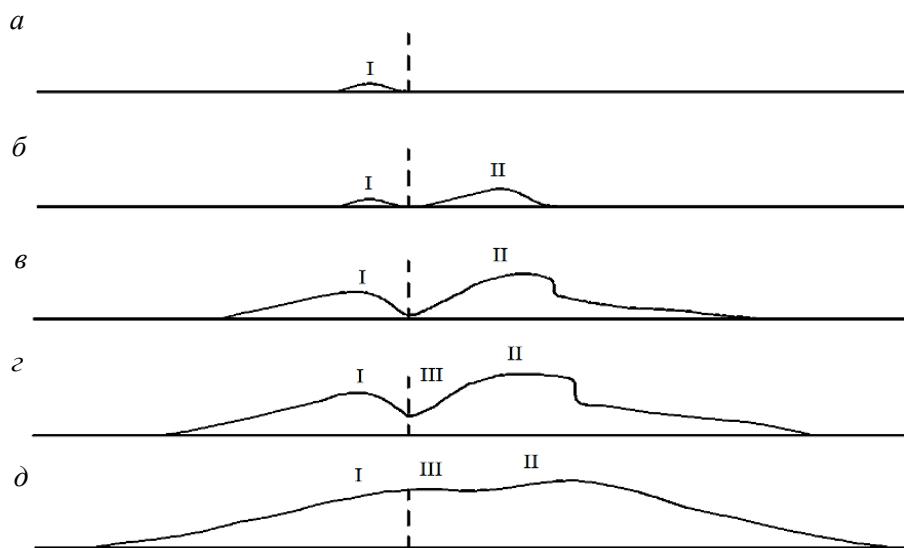


Рис. 1. Динамика отложения снега у решетчатого препятствия с просветностью 35–50 %: *а* – начальные отложения снега перед препятствием; *б* – начальные отложения снега за препятствием; *в* – формирование сугроба за начальным отложением снега; *г* – отложения снега между препятствием и начальным отложением снега; *д* – отложения снега по всей длине зоны со сниженной скоростью снеговетрового потока

Fig. 1. Dynamics of snow deposits near the wall with the transparency of 35–50 %: *a* – initial snow deposits in front of the wall; *b* – initial snow deposits behind the wall; *c* – snowdrift behind the initial snow deposits; *d* – snow deposits between the wall and initial deposits; *e* – along the entire length of the zone of the lower snowdrift rate

Отложения снега у решетчатых препятствий можно разделить на три характерные зоны. Зона I представляет собой первоначальные отложения. Зона II находится за препятствием на некотором расстоянии от снегозащитной конструкции. Зона III располагается непосредственно за сооружением, заполняется снегом при метелях в последнюю очередь.

Формирование пологой, без холмов и впадин, линии снежных отложений является признаком хорошего качества линии снегозащиты. Именно такая форма снежной поверхности гарантирует достижение максимальной снегосборной способности.

Основной проблемой снегозащитных сооружений является их заносимость снегом во время метелей. Зарабатываемость конструкций происходит вследствие плохих условий движения снеговетрового потока и может привести к их повреждениям. Таким образом, при проектировании снегозащитных сооружений необходимо обеспечить пронос снега через защиту без образования отложений снега непосредственно у конструкции.

Применение программного комплекса FlowVision для исследования процессов отложения снега

Основной задачей программного комплекса FlowVision является численное решение уравнений вычислительной гидродинамики, основным из которых считается система уравнений Навье – Стокса, описывающая движение вязкой несжимаемой жидкости [10]. Уравнение движения для трехмерного потока

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= x - \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= y - \frac{dp}{dy} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) &= z - \frac{dp}{dz} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где u, v, ω – составляющие скорости потока по координатам x, y, z ; ρ, p, μ – плотность, давление и вязкость воздуха; t – время.

Снеговетровой поток при моделировании представлен двухфазным потоком, в котором каждая фаза определяется веществами и физическими процессами. Для каждого физического процесса в программном комплексе FlowVision устанавливалась математическая модель, в соответствии с которой производилось моделирование. Описание параметров, определяющих при метелях взаимодействие веществ в расчетной области, приведено в табл. 1.

Ветровой поток смоделирован веществом «Воздух_Газовая (равновесная)». Для описания ветрового потока используются физические процессы – движение и турбулентность.

Таблица 1

Описание параметров, определяющих взаимодействие веществ в расчетной области

Table 1

Parameters of substance interaction in the computational domain

Тип фазы и описание	Вещества	Физические процессы	Математическая модель
Сплошная фаза Ветровой поток	Воздух_Газовая (равновесная)	Движение	Модель Навье – Стокса
		Турбулентность	KES
Дисперсная фаза Снег	Вода_Твердая	Перенос фазы	Конвекция и диффузия
		Движение	Движение

Движение описывается системой уравнений Навье – Стокса для трехмерного потока.

Для моделирования турбулентности принята двухпараметрическая модель изотропной турбулентности KES, основанная на RANS-подходе (осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса). В этой модели рассчитываются *k*-*ε* модели – уравнения переноса записываются для кинетической энергии турбулентности (*k*) и скорости диссипации турбулентной энергии (*ε*).

Модель *k*-*ε* «Стандартная»:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho (P_k + G_k) - \rho \epsilon \left(1 + \xi \left(\max(M_t^2, M_{t0}^2) - M_{t0}^2 \right) \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \epsilon) = \nabla \left(\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \rho (P_k + G_k) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}; \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}; \quad (6)$$

$$P_k = v_t \left(S - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V)^2 \right) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) k; \quad (7)$$

$$G_k = v_t \frac{\beta}{Pr_t} g \nabla T; \quad (8)$$

$$S = 2 \sum_{i,j} S_{ij} S_{ij} = \sum_{i,j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_j}{\partial x_i}; \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right); \quad (10)$$

$$M_t^2 = \frac{2k}{C^2}; \quad (11)$$

$$\sigma_k = 1; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3; \quad C_1 = 1,44; \quad C_2 = 1,44; \quad \xi = 1,5, \quad (12)$$

где y – расстояние до ближайшей стенки; $C_\mu = 0,09$ – фиксированная модельная константа.

Указанные значения констант (12) – значения по умолчанию. Константы ξ и $M_{f,0}$ определяют модель, учитывающую сжимаемость жидкости. При $\xi = 0$ сжимаемость жидкости в уравнении не учитывается.

Модель KES является самой простой моделью семейства k - ε , и ее рекомендуется принимать для задач со свободной турбулентностью.

Снег смоделирован веществом «Вода_Твердая» с учетом плотности снега в метлевом потоке. В соответствии с данными, полученными из специального справочника, приняты: значение плотности снега $\delta = 50 \text{ кг/м}^3$, соответствующее типу «Рыхлый сухой свежевыпавший снег», и значение диаметра частиц, описывающих снежинки, $d = 0,003 \text{ м}$, соответствующее усредненным данным о величине частиц снега [11].

Для описания снега принята дисперсная система «частицы + сплошная». В программе FlowVision при описании частицы объединяют в дисперсное облако. Таким образом, физические процессы описываются не для каждой частицы в отдельности, а для объема пространства, обладающего свойствами сплошной среды. При моделировании многофазного течения облако частиц и несущая сплошная фаза взаимодействуют как взаимопроникающие сплошные среды. Для учета взаимодействия частиц между собой в рамках метода Эйлера во FlowVision реализована простая модель отталкивания частиц, включающая в уравнение движения частиц дополнительное слагаемое с коэффициентами.

При постановке задачи учтено, что исследуемый процесс происходит при постоянной температуре и масса снега не меняется со временем. Поэтому физические процессы «Теплоперенос» и «Массоперенос» исключены из расчета.

Перечень параметров общих установок эксперимента и их характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры общих установок, определяемые для расчетной области

Table 2

Computational domain parameters

Параметр	Значение	Пояснение к выбору параметра
Температура, К	268	Температура, определяющая расчетную область. Относительно нее задаются другие температуры в проекте, если они необходимы, если такой необходимости нет, то температура устанавливается по умолчанию для всех процессов При исследованиях температура принята -5°C , что соответствует средней температуре воздуха при метелях
Давление, Па	101325	Давление в расчетной области. Принято соответствующим нормальному атмосферному давлению
g-плотность, кг/м^3	1,3163	Плотность среды

Для задания параметров среды, находящейся на границе расчетной области, были определены граничные условия. В задаче моделирования работы снегозадерживающих заборов из сеток на полимерной основе во время метели применяется четыре вида граничных условий: стенка, свободный выход, вход/выход и симметрия. Параметры граничных условий в зависимости от группы поверхности аэродинамического канала приведены в табл. 3.

Таблица 3
Граничные условия для поверхностей аэродинамического канала
Table 3
Boundary conditions for aerodynamic channel surface

Группа	Граничное условие	Геометрические элементы	Наименование параметра	Значение параметра
1	Стенка	Все поверхности, ограничивающие расчетную область снизу и сетчатое ограждение	Скорость (дисп.) (Фаза #1) Коэффициент норм. Коэффициент танг. (данные коэффициенты определяют характер взаимодействия дисперсной фазы со стенкой – упругий отскок с сохранением касательной составляющей скорости)	$k_x = 1$; $k_y = 1$
2	Свободный выход	Поверхность, ограничивающая расчетную область сверху и поверхность выхода потока	Параметры стандартные	Значения стандартные
3	Вход/Выход	Поверхность входа потока	Скорость (Фаза #0) Массовая скорость Объем фазы (Фаза #1) Значение Скорость (дисп.) (Фаза #1) Скорость частиц	19,7445 кг/м ² с 0,0016 15 м/с
4	Симметрия	Поверхности, ограничивающие расчетную область справа и слева по ходу потока	Объем фазы (Фаза #1) Скорость (дисп.) (Фаза #1)	Проницаемая поверхность Проницаемая поверхность

Описанный подход применяется для моделирования снегозаносимости автомагистралей во время метелей [12–17], что делает возможным его использование для описания процесса обтекания снеговетровым потоком решетчатых снегозадерживающих заборов.

Создание геометрических моделей снегозадерживающих заборов

Проведено моделирование работы снегозадерживающих заборов из сеток на полимерной основе. В серии экспериментов рассматривались однопанельные и двухпанельные конструкции, схемы которых приведены на рис. 2, 3.

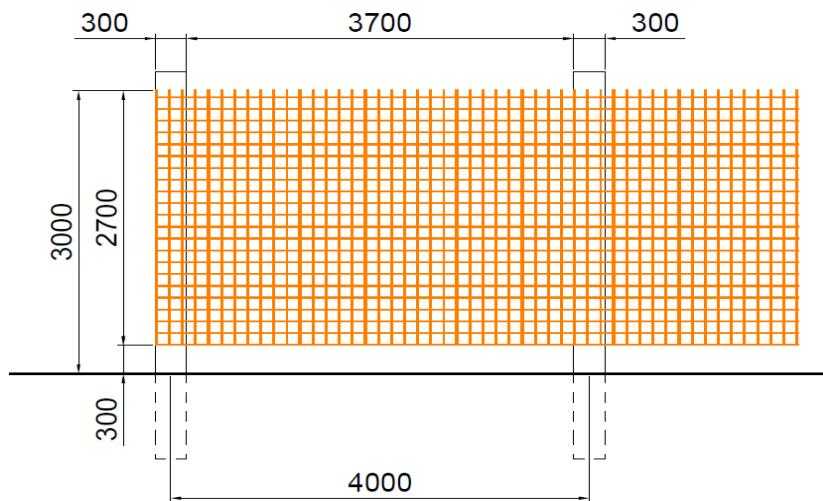


Рис. 2. Однопанельный снегозадерживающий забор из полимерных сеток

Fig. 2. Single-panel polymer mesh wall against snowdrifts

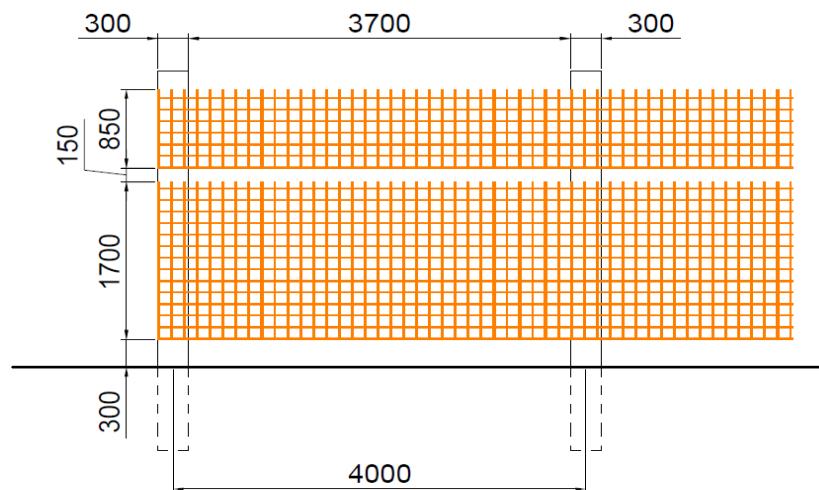


Рис. 3. Двухпанельный снегозадерживающий забор из полимерных сеток

Fig. 3. Double-panel polymer mesh wall against snowdrifts

Выбор конструкции снегозадерживающих заборов обусловлен типовыми конструкциями, которые используются для защиты дорог от снега на автомагистралях. Учитывались их параметры и имеющиеся на рынке размеры полимерных сеток. Ширина стандартного рулона полимерной сетки составляет 1,7 м. Такая

ширина рулона удобна в применении для заборов высотой 2,0 м при относительно небольших объемах снегоприноса во время метелей за зиму. При больших значениях объемов снегоприноса проектируют заборы высотой более 3,0 м.

В настоящем исследовании рассматривались две конструкции снегозадерживающего забора высотой 3,0 м. Первая конструкция предусматривает крепление полимерной сетки шириной 2,7 м на высоте от земли 0,30 м. Вторая конструкция предусматривает двухпанельное крепление сетки с зазором между панелями величиной 0,15 м. Нижняя панель в этом случае имеет ширину 1,7 м, а верхняя – 0,85 м. Моделирование работы такой конструкции во время прохождения метели проведено для оценки влияния зазора между панелями на снегосборную способность забора. Просветность исследуемой полимерной сетки составляет 50 %.

Созданы геометрические модели однопанельного и двухпанельного снегозадерживающих заборов высотой 3,0 м с просветностью 50 %, а также модель канала в программе 3D MAX. Вид геометрической модели двухпанельного снегозадерживающего забора показан на рис. 4.

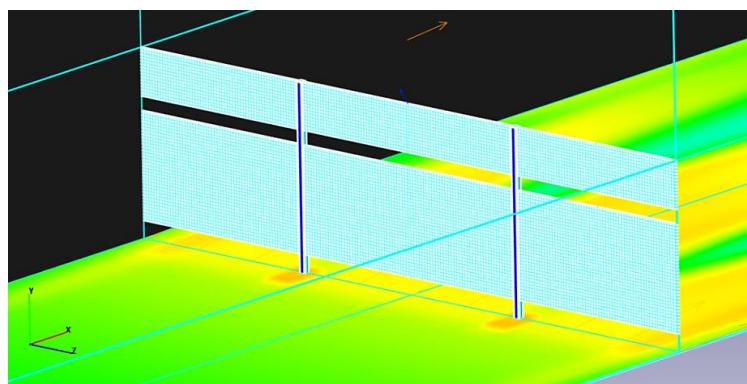


Рис. 4. Общий вид геометрической модели двухпанельного снегозадерживающего забора, загруженной в программный комплекс FlowVision
Fig. 4. FlowVision model of the double-panel wall

Геометрическая модель канала представляет собой замкнутую геометрическую фигуру, приближенную к параллелепипеду, в объеме которого находится снегозащитная конструкция, расположенная под углом 90° к входу в канал.

Длина канала обусловлена расстоянием от обтекаемого тела до границ области. Это расстояние задается таким образом, чтобы граничные условия, заданные на границах области, не оказывали возмущающего влияния на поток вблизи обтекаемого тела. В данной задаче требуется разрешить поток в области снегозадерживающего забора, который был принят за объект обтекания.

Ширина и высота канала приняты 10 м. При назначении высоты канала было учтено условие отсутствия влияния объекта обтекания на полевую скорость снеговетрового потока. Под полевой скоростью снеговетрового потока понимается скорость потока в свободном состоянии при отсутствии препятствий.

На рис. 5 представлена модель канала, в котором размещена геометрическая модель снегозащитной конструкции.

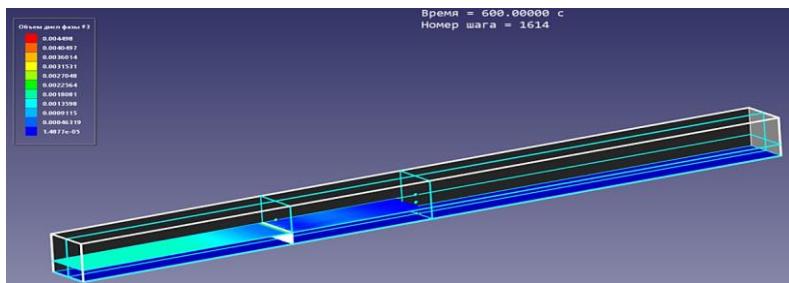


Рис. 5. Геометрическая модель канала
Fig. 5. Channel geometrical model

Моделирование работы снегозадерживающих заборов

Моделирование работы снегозадерживающих заборов проводилось при скорости ветра во время метели 15 м/с. На рис. 6 представлено распределение характеристик снеговетрового потока при моделировании работы двухпанельного снегозадерживающего забора высотой 3,0 м с просветностью 50 %.

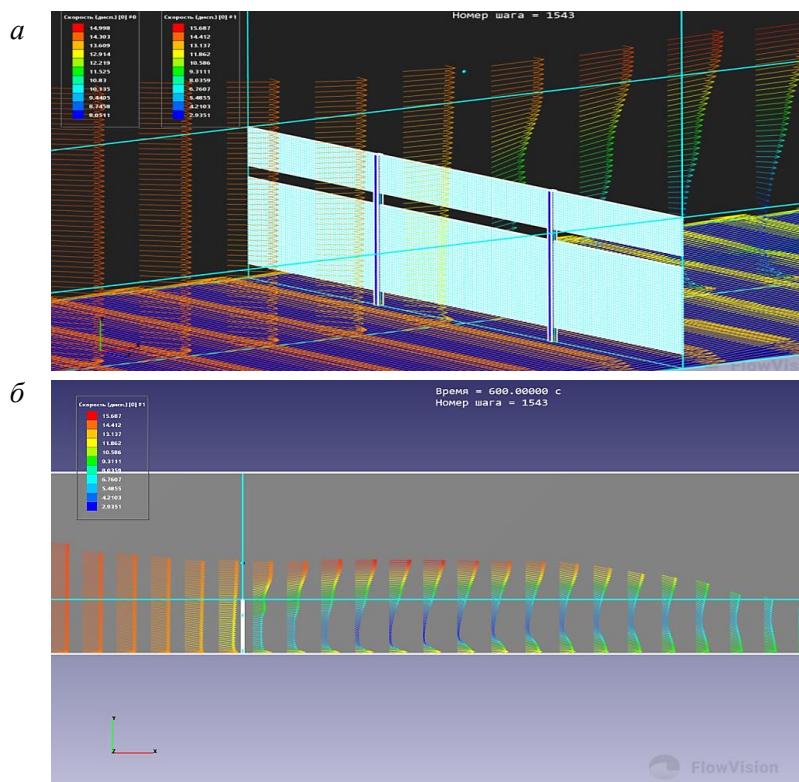


Рис. 6. Моделирование работы двухпанельного снегозадерживающего забора высотой 3,0 м с просветностью 50 % в программном комплексе FlowVision:
а – распределение твердой фазы; б – распределение скорости снеговетрового потока
FlowVision simulation of double-panel wall operation 3.0 m high with 50 % transparency:
a – solid phase distribution; b – snowdrift rate distribution

Результаты моделирования работы снегозадерживающих заборов в виде эпюров распределения скорости снеговетрового потока представлены на рис. 7 и 8.

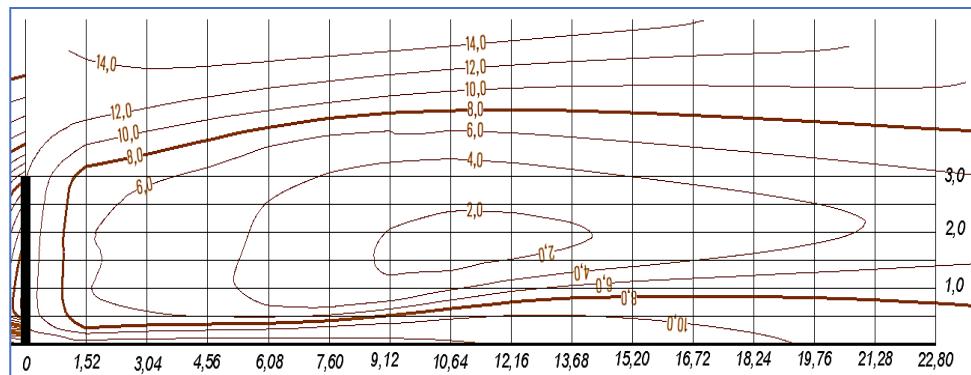


Рис. 7. Распределение скорости снеговетрового потока у однопанельного снегозадерживающего забора высотой 3,0 м с просветностью 50 %

Fig. 7. Snowdrift rate distribution near the single-panel wall 3.0 m high and 50 % transparency

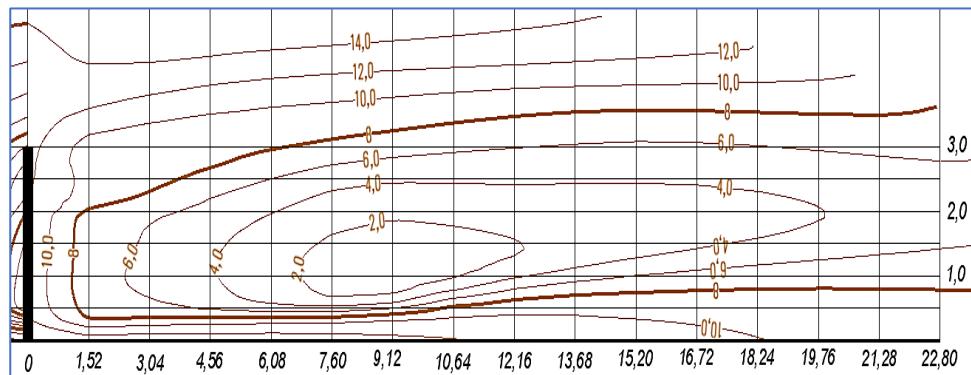


Рис. 8. Распределение скорости снеговетрового потока у двухпанельного снегозадерживающего забора высотой 3,0 м с просветностью 50 %

Fig. 8. Snowdrift rate distribution near the double-panel snow fence 3.0 m high and 50 % transparency

Анализ распределения скоростей снеговетрового потока за снегозадерживающими заборами позволил выявить в горизонтальной и вертикальной проекциях зоны сниженной скорости, в которых ожидается формирование снежных отложений.

Зона распределения наиболее сниженной скорости снеговетрового потока по горизонтали за двухпанельным снегозадерживающим забором образуется на расстоянии 6,5–12,2 м, за однопанельным – на расстоянии 9,0–13,2 м.

Однако скорость снеговетрового потока на расстоянии 1,5 м за двухпанельным снегозадерживающим забором составила 8,0 м/с, а за однопанельным – 6,0 м/с. Таким образом, снижение скорости снеговетрового потока за двухпанельной конструкцией происходит медленнее, чем за однопанельной.

Такое распределение скоростей позволяет сделать вывод, что снежный вал за двухпанельным препятствием будет формироваться на более удаленном расстоянии. Следовательно, вероятность заработанности конструкции во время метели у такой снегозащиты ниже, чем у однопанельной. Наличие продуваемого зазора между панелями способствует отдалению снежного вала от препятствия без увеличения проноса снега. Кроме того, ширина снежного вала у двухпанельных заборов будет большей протяженности.

В то же время общая протяженность зоны сниженной скорости за двухпанельным забором составила не более 50 м, а за однопанельным – не более 60 м.

Зона распределения сниженной скорости снеговетрового потока по вертикали за двухпанельным снегозадерживающим забором формируется ниже, чем за однопанельным. На расстоянии 12,0 м от препятствия за двухпанельным забором высота снежного вала при максимальных объемах снегоприноса на конец зимы прогнозируется до 3,6 м; за однопанельным – до 4,2 м.

Таким образом, наличие просвета между панелями забора не создает условий для размытия потоком воздуха снежного вала за забором, а напротив, способствует его увеличению в длину. Оценка снегосборной способности заборов показала, что у двухпанельных заборов рассматриваемой конструкции этот показатель ожидается не более чем на 5–6 % меньше, чем у однопанельных, при достижении максимальных значений.

Заключение

Анализ результатов моделирования работы двухпанельного снегозадерживающего забора высотой 3,0 м из сеток на полимерной основе с просветностью 50 % показал, что за препятствием с подветренной стороны формируется более широкий и пологий снежный вал, чем за однопанельной конструкцией.

Снегосборная способность двухпанельного забора рассматриваемой конструкции незначительно уступает однопанельному. Однако максимальная протяженность снежных отложений за двухпанельным забором будет меньше, чем за однопанельным, поскольку зона сниженной скорости за двухпанельным забором по протяженности меньше, следовательно, снежные отложения формируются ближе к забору. Таким образом, двухпанельные заборы рассматриваемой конструкции можно устанавливать ближе к дороге, чем однопанельные. Более близкое размещение снегозащиты к автомобильной дороге позволит проектировать конструкции в случае стесненных условий в полосе отвода. Можно сделать вывод, что применение двухпанельных снегозадерживающих заборов рассматриваемой конструкции обосновано в качестве снегозащиты автомобильных дорог.

Исследования снегозадерживающей способности заборов из сеток на полимерной основе повышают надежность снегозащиты, а моделирование работы конструкций снегозащиты и определение параметров их установки снижают вероятность образования снежных заносов на автомобильных дорогах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самодурова Т.В. Оперативное управление зимним содержанием дорог: Научные основы. Воронеж : Изд-во ВГУ, 2003. 168 с. ISBN 5-9273-0323-4. EDN: QNQXFL

2. Бялобжесский Г.В., Дюнин А.К., Комаров А.А. Снегозащитные щиты и заборы. Москва : Автотрансиздат, 1961. 36 с.
3. Кунгурцев А.А. Проектирование снегозащитных мероприятий на дорогах. Москва : Автотрансиздат, 1961. 108 с.
4. Комаров А.А. Предупреждение снежных заносов на дорогах Заполярья. Новосибирск : Редакционно-издательский отдел Сибирского отделения АН СССР, 1965. 158 с.
5. Потапов М.Г. Защита железнодорожного пути от снега. Москва : Трансжелдориздат, 1958. 120 с.
6. Tabler R.D. Controlling blowing and drifting snow fences and road design. Niwot, Colorado : Tabler and Associates, 2003. 345 p.
7. Basnet K., Constantinescu G., Muste M., Ho H. Method to Assess Efficiency and Improve Design of Snow Fences // Journal of Engineering Mechanics. 2014. October. 12 p.
8. Васильев А.П., Ушаков В.В. Анализ современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог и разработка предложений по его использованию в условиях России. Москва : ФГУП «Информавтодор», 2003. 60 с. ISBN 5-900121-18-6. EDN: QNQRTD
9. Корнеева Д.Ю. Совершенствование конструкций временных снегозадерживающих устройств для применения на скоростных дорогах и автомагистралях : специальность 05.23.11 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корнеева Дарья Юрьевна. Москва, 2016. 135 с. EDN: WOPKSD
10. FlowVision. Руководство пользователя. Москва : ООО «ТЕСИС», 2017. 1395 с.
11. Gray D.M., Male D.H. Снег : справочник. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1986. 751с.
12. Гладышева О.В., Бончева Е.А., Субботина Е.В. Исследование процесса снегонакопления на насыпях автомагистралей во время метелей в программном комплексе FLOWVISION // Научная опора Воронежской области : сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2020. С. 66–70.
13. Миронова Е.В., Рыбакова К.А., Гладышева О.В. Моделирование снегозаносимости автомаршрутной насыпи при различных скоростях снеговетрового потока во время метели // Научная опора Воронежской области : сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2024. С. 138–141. EDN: DFFRXV
14. Самодурова Т.В., Гладышева О.В., Алимова Н.Ю., Бончева Е.А. Моделирование процесса отложения снега на автомагистралях в программе FlowVision // Научный журнал строительства и архитектуры, 2020. № 2 (58). С 72–83. DOI: 10.36622/VSTU.2020.58.2.006. EDN: ICKNVJ
15. Субботина Е.В., Бончева Е.А., Гладышева О.В. Моделирование снегозаносимости участка автомагистрали М-4 «Дон» в Липецкой области в программе FLOWVISION // Научная опора Воронежской области : сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2023. С. 152–155. EDN: EBLINH
16. Миронова Е.В., Бончева Е.А., Гладышева О.В. Моделирование распределения снежных заносов во время метели на участке автомагистрали М-4 «Дон». FLOWVISION // Магистратура – автотранспортной отрасли : материалы VIII Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». Санкт-Петербург, 2024. С. 88–91. EDN: LRBIYM
17. Костин П.С., Субботина Е.В., Гладышева О.В. Создание модели насыпи автомагистрали для исследования процесса снегонакопления во время метелей в программном комплексе FlowVision // Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий, Воронеж, 2019. С. 396–398. EDN: XCFNQX

REFERENCES

1. Samodurova T.V. Operational Management of Road Winter Maintenance: Scientific Foundations. Voronezh: Voronezh State University, 2003. 168 p. ISBN 5-9273-0323-4. EDN: QNQXFL (In Russian)
2. Byalobzheskiy G.V., Dyunin A.K., Komarov A.A. Snow Protection Shields and Fences. Moscow: Avtotransizdat, 1961. 36 p. (In Russian)

3. Kungurtsev A.A. Design of Snow Protection Walls on Roads. Moscow: Avtotransizdat, 1961. 108 p. (In Russian)
4. Komarov A.A. Prevention of Snow Drifts on Roads in the Arctic Region. Novosibirsk, 1965. 158 p. (In Russian)
5. Potapov M.G. Protection of Railway Tracks from Snow. Moscow: Transzheldorizdat, 1958. 120 p. (In Russian)
6. Tabler R.D. Controlling Blowing and Drifting Snow Fences and Road Design. Niwot, Colorado: Tabler and Associates, 2003. 345 p.
7. Basnet K., Constantinescu G., Muste M., Ho H. Method to Assess Efficiency and Improve Design of Snow Fences. *Journal of Engineering Mechanics*. 2014; 12.
8. Vasiliev A.P., Ushakov V.V. Analysis of Modern Foreign Experience in Winter Road Maintenance and Development of Proposals for using in Russia. Moscow: Informavtodor, 2003. 60 p. ISBN 5-900121-18-6. EDN: QNQRTD (In Russian)
9. Korneeva D.Y. "Design improvement of temporary snow protection devices for express roads and highways". PhD Thesis. Moscow, 2016. 135 p. (In Russian)
10. FlowVision. User's Guide. Moscow: OOO "TESIS", 2017.1395 p. (In Russian)
11. Gray D.M., Male D.H. Directory of Snow. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 751 p. (In Russian)
12. Gladysheva O.V., Boncheva E.A., Subbotina E.V. Snow Accumulation Process on Highway Embankments during Snowstorms in FlowVision. In: *Coll. Papers 'Scientific Support of the Voronezh Region'*. Voronezh, 2020. Pp. 66–70. (in Russian)
13. Mironova E.V., Rybakova K.A., Gladysheva O.V. Snowdrift Modeling for Road Embankment at Different Wind Rates during a Snowdrifts. In: *Coll. Papers 'Scientific Support of the Voronezh Region'*. Voronezh, 2024. Pp.138–141. (in Russian)
14. Samodurova T.V., Gladysheva O.V., Alimova N.Yu., Boncheva E.A. Modeling in FlowVision of Snow Deposits on Roads. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2020; 2 (58): 12. DOI: 10.36622/VSTU.2020.58.2.006. EDN: ICKNVJ (in Russian)
15. Subbotina E.V., Boncheva E.A., Gladysheva O.V. Modeling of Snowdrift on M-4 "Don" Road Section in the Lipetsk Region using FlowVision. In: *Coll. Papers 'Scientific Support of the Voronezh Region'*. Voronezh, 2023. Pp. 152–155. (In Russian)
16. Mironova E.V., Boncheva E.A., Gladysheva O.V. Modeling in FlowVision of snow distribution on M-4 "Don" road section. In: *Proc. 8th All-Russ. Conf. 'Master's Degree Readings'*. Saint-Petersburg, 2024. Pp. 88–91. (In Russian)
17. Kostin P.S., Subbotina E.V., Gladysheva O.V. Creation of Highway Embankment Model in FlowVision for Studying Snow Accumulation during Snowdrifts. In: *Coll. Papers 'Scientific Support of the Voronezh Region'*. Voronezh, 2019. Pp. 396–398. (In Russian)

Сведения об авторах

Гладышева Ольга Вадимовна, канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ov-glad@ya.ru

Алимова Наталья Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, natalimowa@ya.ru

Бончева Евгения Александровна, аспирант, Воронежский государственный технический университет, 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, evgesha3581@rambler.ru

Миронова Екатерина Валерьевна, аспирант, Воронежский государственный технический университет, 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, subbotinarulit@yandex.ru

Authors Details

Olga V. Gladysheva, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, ov-glad@ya.ru

Natalia Y. Alimova, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, natalimowa@ya.ru

Evgenia A. Boncheva, Research Assistant, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, evgesha3581@rambler.ru

Ekaterina V. Mironova, Research Assistant, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, subbotinarulit@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 03.10.2025
Одобрена после рецензирования 09.10.2025
Принята к публикации 13.10.2025

Submitted for publication 03.10.2025
Approved after review 09.10.2025
Accepted for publication 13.10.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 257–271.

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 (6): 257–271.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.8+667.621

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-257-271

EDN: OSPFUR

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПУТЕМ ИХ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ

Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич

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

Аннотация. Актуальность. Повышение устойчивости и долговечности, а также совершенствования функциональности асфальтобетонов – одна из самых актуальных задач транспортного строительства. Это связано с необходимостью преодоления быстрого разрушения дорожных одежд под воздействием растущих транспортных нагрузок и негативного влияния климатических факторов.

Цель работы – анализ и обобщение имеющихся результатов по теме исследования и выработка рекомендаций, касающихся наилучших доступных, экономически выгодных способов получения композиционных асфальтобетонных смесей путем полимерно-дисперсного армирования.

Методы. Для оценки особенностей технологий дисперсного армирования асфальтобетонных смесей рассмотрены научные публикации, посвященные изучению влияния физико-химических свойств и химического состава используемых материалов и размеров фибры, температурных режимов, способа их введения в смеси. Применялись общелогические методы (анализ, синтез, абстрагирование, обобщение, классификация, моделирование), общенаучные и частнонаучные подходы в строительном материаловедении.

Результаты. Обзор литературы из отечественных и зарубежных источников позволил выявить основные тренды развития технологий дисперсного армирования в дорожно-строительном материаловедении. Первое направление – расширение ассортимента материалов дисперсной арматуры (органических и неорганических; природных и синтетических по происхождению). Второе – поиск и оптимизация способов введения арматуры (фибры) в асфальтобетонную смесь на стадии ее получения. Третье – изучение физико-химических механизмов, лежащих в основе взаимодействия между частицами арматуры и компонентами АБС и влияния на них качества вяжущего (битума), минерального порошка, песка, щебня, добавок.

Выводы. Реализация рекомендаций, касающихся наиболее эффективных способов дисперсного армирования асфальтобетона, обеспечения нормативно-правовой базы их реализации позволит повысить эксплуатационные показатели автомобильных дорог с асфальтобетонным покрытием.

Ключевые слова: полимерно-дисперсное армирование, фиброасфальтобетон, дисперсно-армированный асфальтобетон, фибра, полимерные волокна, физико-механические свойства, технология асфальтобетона

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Улучшение характеристик асфальтобетонных покрытий путем их дисперсного армирования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 257–271. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-257-271. EDN: OSPFUR

ORIGINAL ARTICLE

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS BY FIBER REINFORCEMENT

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Improvement of asphalt concrete stability, durability, and functionality, is one of the most important challenges in the transport construction. This is due to the need to overcome the rapid pavement deterioration under the influence of increasing traffic load and negative impact of climatic conditions.

Purpose: The objective of the work is to analyze and summarize research results and develop recommendations regarding the best available, costeffective methods for producing composite asphalt concrete mixtures using polymer fiber reinforcement.

Methodology/approach: To evaluate the polymer fiber reinforcement of asphalt concrete mixtures, much efforts has been done to study the influence of physicochemical properties and chemical composition of materials, fiber size, temperature conditions, and fiber introduction in the mixture. General logical methods (analysis, synthesis, abstraction, generalization, classification and modeling) and general and specific scientific approaches are used in construction materials science.

Research findings: According to the literature, key trends in the development of fiber reinforcement techniques are determined for materials science in the road construction. The first is expanding the range of fiberreinforced materials (organic and inorganic, natural and synthetic). The second is identifying and optimizing methods for fiber introduction in the asphalt concrete mixture during its production from raw materials. The third is studying physicochemical mechanisms underlying the interaction between reinforcing particles and asphalt concrete components and the quality of bitumen, mineral powder, sand, crushed stone and additives.

Value: Implementation of recommendations regarding the most effective methods of fiber reinforcement of asphalt concrete and a regulatory framework for their implementation will improve the road pavement performance.

Keywords: polymer fiber reinforcement, fiber-reinforced asphalt concrete, physical and mechanical properties, asphalt concrete

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Performance Improvement of Asphalt Concrete Pavements by Fiber Reinforcement. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 257–271. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-257-271. EDN: OSPFUR

Введение

Поиск путей повышения устойчивости покрытий автомобильных дорог из асфальтобетона к внешним нагрузкам многие годы продолжает оставаться актуальной задачей теоретических исследований и опытно-конструкторских работ в сфере дорожного строительства [1–5]. Одним из способов улучшения эксплуатационных характеристик (например, устойчивости и долговечности асфальтобетонных покрытий, увеличения межремонтных сроков магистралей) является дисперсное армирование [6–15].

Под дисперсным армированием асфальтобетонной смеси (АБС) понимается введение в нее волокон (фибры) или нитей с равномерным их распределением по объему АБС. В качестве дисперсной арматуры могут быть использованы следующие материалы: стальная проволока (ОДМ 218.2.014–2011 «Методические рекомендации по применению сталифибробетона при ремонте мостовых сооружений», а также [7]); полимерные волокна [8, 13, 15–19]; базальтовая фибра (Методические рекомендации по технологии армирования асфальтобетонных покрытий добавками базальтовых волокон (фиброй) при строительстве и ремонте автомобильных дорог утверждены распоряжением Росавтодора от 11.01.2002 № ОС-12-р), подтвержденные исследованиями С.Ю. Андронова [11] и другими [2, 4, 7, 14].

Нами было установлено, что положительный эффект от введения дисперсной арматуры связан со следующими факторами:

- создается пространственная армирующая решетка, окружающая минеральные частицы;
- повышается прочность асфальтобетона при сдвиге;
- повышается прочность асфальтобетона при растяжении при отрицательных температурах;
- улучшается деформативность при температурах ниже 0 °C;
- повышается усталостная прочность.

Лабораторные испытания показали, что применение дисперсной арматуры для создания долговечной каркасно-сетчатой системы в битумоминеральной композиции обеспечивает дополнительную связь между частицами минерального материала. Этот эффект достигается за счет волокон, зажатых в структурированных слоях битума, и приводит к улучшению эксплуатационных характеристик: водо-, тепло- и трещиностойкости, а также сдвигостойчивости материала [13, 19, 20].

В зависимости от диаметра и структуры волокон дисперсная арматура может располагаться в адсорбционном слое, не влияя на упаковку минеральных частиц, либо выходить за его пределы, расклинивая их.

Основными причинами, сдерживающими практическое внедрение способов дисперсного армирования АБС, предлагаемых в научной литературе [21–25], на наш взгляд, являются:

- 1) разрозненность фактических данных;
- 2) недостаточность доказательной базы, основанной на мониторинге качества дорожных покрытий,озводенных с применением такой арматуры;
- 3) слабая инженерная проработка эффективных методов введения и распределения фибры в асфальтобетонной смеси.

Целью настоящей работы является анализ и обобщение имеющихся результатов по теме исследования и выработка рекомендаций, касающихся наилучших доступных, экономически выгодных способов получения композиционных асфальтобетонных смесей путем полимерно-дисперсного армирования.

Методы исследования

Для анализа особенностей известных сегодня технологий дисперсного армирования АБС были рассмотрены научные публикации, посвященные изучению влияния на эксплуатационные характеристики асфальтобетона физико-

химических свойств и химического состава используемых материалов и размеров фибры, температурных режимов, а также способа их введения в АБС. В рассмотренных публикациях использованы традиционные и специфические методы исследования армированных образцов. К ним относятся: проведение по стандартным методикам испытаний на стабильность и текучесть; определение объемной плотности и сопротивления образцов пластическому течению; оценка водостойкости; изучение методом трехточечного испытания образцов асфальтобетона на изгиб; определение стойкости к колеобразованию и разрушающей нагрузки (по Маршаллу) [2, 6, 10, 12, 25 – 27]. В ряде работ исследователи использовали оригинальные авторские методики [13, 22, 28, 29], а также специфические, рекомендованные нормативами и стандартами для тех стран, где их применяют.

Результаты и их обсуждение

Обзор литературы из отечественных и зарубежных источников позволил выявить основные тренды развития технологий дисперсного армирования в дорожно-строительном материаловедении.

Первое направление – расширение ассортимента материалов дисперсной арматуры (неорганических и органических; природных и синтетических по происхождению).

Второе – поиск и оптимизация способов введения арматуры (фибры) в асфальтобетонную смесь на стадии ее получения из сырьевых материалов.

Третье – изучение физико-химических механизмов, лежащих в основе взаимодействия между частицами арматуры и другими компонентами АБС – вяжущего (битума), минерального порошка, щебня, песка, модифицирующих добавок.

Другие возможные направления либо слабо представлены (содержатся в единичных публикациях, не имеют достаточной доказательной базы); либо не представляют интерес ввиду региональной/территориальной специфики какой-либо страны с условиями, далекими от российских; либо при пристальном рассмотрении могут быть отнесены к одному из трех упомянутых направлений.

Охарактеризуем проблемное поле **первого направления** с упоминанием научных публикаций, посвященных каждому из приведенных примеров. К материалам, испытанным в качестве дисперсной арматуры в асфальтобетонах, относятся:

1. *Неорганические волокна из природных минералов и стекла*: стеклофибра [30], базальтовая фибра [31, 32], диатомитовое стекло [33], стальная фибра [34], хризотил-асbestовые [25, 26, 35], магнезиальные [36] волокнистые материалы.

Использование стеклофибры в дорожном строительстве нельзя назвать однозначно позитивным, как это принято для стеклоармированного цементобетона. Хрупкость тонких стекловолокон, трудности с аппаратурой (устройствами) для их введения в АБС, слабая проработка выбора режимов (температурных, временных), учета химических взаимодействий между компонентами минерального порошка и стекла, других возможных при старении асфальтобетона процессов, отсутствие разработанной, апробированной и документально закрепленной технологии такого дисперсного армирования не позволяют на

данном этапе НИР и ОКР рекомендовать для широкого внедрения в практику. Вместе с тем разработка технологий с использованием отходов стекла представляется весьма перспективной ввиду экономической и экологической целесообразности.

Положительный эффект при использовании базальтовой фибры проявляется в ее термической, коррозионной и влагостойкости; в высокой прочности, трещиноустойчивости полученного армированного асфальтобетона. Базальтовая фибра способна поглощать часть звуковых волн. Она позволяет уменьшать слой асфальтового покрытия на 20 %, продлевает межремонтный период, снижая расходы на техническое обслуживание дорожного полотна.

Вместе с тем при введении базальтовой фибры имеются сложности с ее равномерным распределением; волокна базальта легко разрушаются в процессе перемешивания АБС.

В зарубежной научной литературе асфальтобетон, модифицированный стальной фиброй, называется steel fiber-reinforced asphalt concrete (SFRAC). Стальная фибра, введенная в АБС в количестве 0,5–1,0 масс. %, характеризуется недостаточным сцеплением с асфальтобетоном, вследствие чего устойчивость асфальтобетонного покрытия снижается на 20 % [34]. Несмотря на это, использование стальной фибры, благодаря повышению электропроводности дорожного покрытия и связанными с этим возможностями новых областей применения (например, разогрев асфальтобетона электричеством), авторы считают революционным.

Упоминание в качестве фибры углеродных (графитовых) нанотрубок, волокон [37], с учетом хрупкости углерода, по нашему мнению, связано не с их армирующим действием, а с поверхностным взаимодействием «графит – битум», улучшением адгезии, необходимой для хорошего сцепления битума с песком и ростом динамической стабильности АБС. Нанотрубки обеспечивают прочное сцепление битума с песком, т. к. обладают высокими адгезионными свойствами, замедляют процесс старения асфальтобетона. Таким образом, употребление термина «модифицирующая добавка» в отношении наноуглеродных трубок более правомерно, чем «армирующая». Этот вывод подтверждается рядом исследований, показывающих, что использование в качестве добавки в АБС даже более дешевого, чем нанотрубки, технического углерода оказывает положительное воздействие на качество асфальтобетона.

В составе магнезиального материала брусита основным минералом является MgO. Брусит может представлять собой пластинчатые, листовые, массивные, волокнистые агрегаты. Термическое разложение происходит в интервале температур от 350 до 400 °С, при этом выделяются оксид магния и вода. Этот факт, а также слаботщелочные свойства, огнестойкость, хорошая адсорбционная способность и экологичность позволяют назвать брусит перспективным для дисперсного армирования асфальтобетона.

2. *Природные органические волокна*: джутовые волокна [39], бамбук [40], лигнин [41], стебли кукурузы [42].

Главным достоинством применения таких волокон является реализация принципов устойчивого развития, поскольку одновременно с упрочнением асфальтобетона используются возобновляемые растительные ресурсы и отходы.

Введение в АБС 0,5–1,0 масс. % джути повышает ее стабильность за счет уменьшения содержания в смеси летучих жирных кислот, общего удельного веса, текучести, воздушных пустот.

Волокна бамбука и сахарного тростника при введении в АБС улучшают показатели на прочность и растяжение, продляют срок службы дорожного покрытия. Использование кукурузных стеблей (понимаем – целлюлозных волокон) улучшает механические характеристики смеси и термостабильность.

Основные затруднения при использовании природных органических волокон (как правило, являющихся отходами сельского хозяйства или переработки древесины): смешивание с компонентами АБС (сплетение в «комки»); разрушение структуры макромолекул целлюлозы под действием природно-климатических факторов (перепады температур, разложение в присутствии воды); сложность выбора оптимальных режимов (состав АБС, последовательность операций), что связано с различиями в качестве исходного органического волокнистого сырья.

3. *Полимерно-органические синтетические волокна*: полизифирное (нейлон, полиэтилентерефталат – ПЭТФ, полиакрилонитрил – ПАН) [43], углеводородное (полипропиленовое) [44], ароматические полиамидные волокна (арамидное) [45].

Перечисленные здесь и другие полимерные волокна, по сравнению с рассматриваемыми типами материалов фибр для дисперсного армирования АБС, вызывают наибольший интерес исследователей. Им посвящены многочисленные отечественные и зарубежные публикации [4–6, 8–11, 13, 15–18, 21–23, 43–47].

В этих работах, как правило, показано улучшение прочностных и деформационных свойств полимерно-дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей по сравнению с неармированными образцами. Арамидные волокна не уступают по прочности стальным, и при этом их плотность в пять раз меньше. Они характеризуются большим модулем упругости и прочностью на растяжение, не поддаются коррозии, устойчивы к высоким температурам. Волокна из полиуретановых и поливинилхлоридных полимеров, напротив, претерпевают деструкцию при нагревании до температур выше 110 °С, этим объясняется запрет на их применение в качестве армирующих материалов для АБС.

Интерес исследователей вызывает поиск двухкомпонентных армирующих волокон, например, скрученных из мононитей полипропилена и арамида. Полипропиленовые нити, скрученные в пучки, способствуют перемешиванию и распределению арамидных волокон. Арамидные волокна, в свою очередь, улучшают высокопрочные, высокотемпературные свойства асфальтобетонной смеси, играя армирующую роль. В США (штат Аризона) опытным путем установлено, что использование отрезков таких волокон длиной 19/38 мм обеспечивает прочность при растяжении 4900–28000 г/см² (по данным ИНДОРТЕХ <https://uneedusgroup.com/file-manager/files/1/Презентация%20Форта.pdf>). Выпускаемая под торговой маркой FORTA FI (<https://bavcompany.ru/catalog/materials/arkhiv-materialov/dobavka-forta/?ysclid=mi7a6b3byj344831431>) патентованная) смесь двух полимерных волокон для дисперсного армирования при введении 0,5 кг на 1 т АБС предотвращает отраженное трещинообразование, колеобразование, дает возможность уменьшить толщину слоя без потери устойчивости.

Проблемное поле **второго направления**, связанного с поиском и оптимизацией способов введения арматуры (фибры) в асфальтобетонную смесь на стадии ее получения [21, 23, 31, 32, 36, 37, 39, 48–51], включает следующие аспекты:

- отсутствие теоретически обоснованной, экспериментально отработанной в производственных и эксплуатационных условиях технологии введения фибры в состав смеси. В России в настоящее время отсутствует широкий опыт производства асфальтобетонных смесей с добавление фибры на асфальтобетонных заводах;
- трудности обеспечения однородного распределения волокон в составе асфальтобетонной смеси;
- недостаточно изучены технологические свойства армированных асфальтобетонных смесей, а также деформационно-прочностные характеристики асфальтобетонов с комплексно модифицированной структурой;
- необходимость разработки и усовершенствования устройств для обработки армирующих волокон при производстве композиционных дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей.

Третье из рассматриваемых направлений (изучение физико-химических механизмов, лежащих в основе взаимодействия между частицами арматуры и компонентами АБС и влияния на них качества вяжущего (битума), минерального порошка, песка, щебня, добавок) характеризуется меньшим, по сравнению с двумя предыдущими, количеством отечественных публикаций [21, 23, 27, 38, 52–56]. Это связано с необходимостью использования дорогостоящего оборудования для проведения исследований; со сложностью самого предмета исследования – сырьевой и технологической нестабильностью материалов АБС и взаимным влиянием «матрицы» всех компонентов смеси; малочисленностью ученых-экспериментаторов и специалистов в промышленности, заинтересованных в разработке инноваций. Прочность, создаваемая на поверхности частиц, зависит от связей, которые определяются природой минеральных материалов, фибры и активностью битума. Их «тонкое» физико-химическое взаимодействие – предмет исследования дополняющими друг друга физико-химическими методами:

- электронная микроскопия (позволяет изучать состояние волокон дисперсной арматуры, их деформацию при уплотнении смеси и защемлении зернами минерального материала);
- ИК-спектроскопия (используется для исследования химического поведения волокон дисперсной арматуры под воздействием внешних факторов (ультрафиолета, природно-климатических нагрузок);
- методы теории перколяции (позволяют описать возникновение связных структур из дисперсных волокон в структуре асфальтобетона);
- традиционные лабораторные испытания образцов с определением физико-механических показателей АБС, подвергнутых армированию (плотность, водонасыщение, прочность при разных температурах и сдвигостойчивость).

Среди рассматриваемых проблем третьего направления можно выделить: адгезионное взаимодействие битума с частицами минерального порошка, которые выступают узлами, адсорбирующими асфальтосмолистые составляющие битума и обеспечивающими взаимное сцепление компонентов; влияние каче-

ства битума, поскольку важно оптимальное содержание смол, масел и асфальтенов в битуме, а для асфальтобетона в целом – содержание асфальтовяжущего и заполнителя (песка и щебня). В конечном итоге это сказывается и на структурирующей способности частиц дисперсной арматуры.

Перспективным также является обоснование физико-химических основ поиска адгезионных добавок, способных улучшать взаимодействие между битумом, каменным и фиброгенным материалом, повышать сцепление, водостойкость, износостойкость и морозостойкость асфальтобетона.

Среди работ по активации битумных вяжущих выделяются способы, включающие тепловую обработку, гидродинамическую кавитацию, воздействие электромагнитных полей, ультразвуковую обработку, радиационное воздействие и электрогидравлический эффект. Использование полимерных материалов, загрязненных нефтепродуктами, получило научное обоснование и имеет несомненную экологическую целесообразность.

Таким образом, изучение физико-химических механизмов взаимодействия фибры и компонентов АБС помогает улучшить характеристики строительных материалов и конструкций, что важно для надежности и долговечности объектов.

Композиционные материалы с заданными свойствами, созданные с использованием армирующих волокон, представляют собой важнейшее направление в дорожно-строительном материаловедении. Определенные успехи в этой области знаний уже получены для армированных цементно-бетонных композиций.

Заключение

В России ощущается явный недостаток ученых и научных школ, деятельность которых могла бы значительно улучшить сложившуюся ситуацию с реализацией инноваций в дорожном строительстве в условиях санкционных ограничений.

Изучение физико-химических механизмов, лежащих в основе взаимодействия между частицами дисперсной арматуры (фибры) и компонентами АБС, важно по нескольким причинам.

Во-первых, это необходимость понимания свойств армированных композиционных материалов. Компоненты композита (матрица и волокна (частицы)) находятся во взаимодействии, которым можно управлять для получения структуры материала с заданными свойствами.

Во-вторых, понимание средств оптимизации структуры и свойств АБС при установленных экспериментально или методами математического моделирования режимах введения волокон позволяет создать методологическую основу для широкого внедрения наилучших доступных технологий.

В-третьих, реализация возможности повышения эффективности дорожного строительства. Применение фибры для армирования вместо армирующей сетки/каркаса позволяет снизить затраты на строительство, сократить расход асфальтобетона. При этом автодороги, построенные с использованием надежного дисперсно-армированного покрытия, смогут выдерживать высокие транспортные нагрузки благодаря приобретению дополнительной жесткости и увеличению прочностных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Васильев Ю.Э. и др.* Инновационные технологии в производстве асфальтобетонных смесей. Москва : МАДИ, 2016. 116 с. EDN: XQYGRD
2. *Игнатьев А.А.* Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия КГАСУ. 2023. № 1 (63). С. 14–30. DOI: 10.52409/20731523_2023_1_14. EDN: EXDWYX
3. *Котлярский Э.В.* Повышение долговечности покрытий автомобильных дорог за счет оптимизации структуры асфальтобетонов : специальность 05.23.05: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Белгород, 2012. 45 с. EDN: SUUYWZ
4. *Гончарова М.А., Ткачева И.А.* Повышение прочности асфальтобетонных смесей для ремонта жестких дорожных конструкций // Строительные материалы. 2023. № 1–2. С. 33–37. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-33-37. EDN: WTQNXK
5. *Беляев К.В.* Пути повышения эксплуатационных свойств асфальтобетона // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных ; Министерство образования и науки Российской Федерации ; Правительство Омской области ; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2018. С. 416–422.
6. *Строев Д.А., Чан Н.Х., Горелов С.В.* Снижение интенсивности развития пластических деформаций с помощью дисперсного армирования дорожно-строительных материалов добавками минерального волокна // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 1 (30). С. 192–199. EDN: NDXCIP
7. *Талантова К., Толстенев С.* Композит-сталефибробетон в дорожном строительстве // Автомобильные дороги. 1999. №9. С. 24–26. EDN: ZDQSIX
8. *Пищеничных О.А., Пожидаева А.Л., Михайлук Д.С. и др.* Армирование асфальтобетонных смесей синтетическими волокнами // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2021. № 1 (147). С. 80–86. EDN: GNFBMG
9. *Пищеничных О.А., Скорик Д.С.* Опыт применения дисперсно-армированных асфальтобетонов в дорожном строительстве // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 1 (141). С. 121–127. EDN: NUQOOX
10. *Кетов А.И., Пугин К.Г.* Улучшение характеристик асфальтобетонных покрытий за счет их армирования // Химия. Экология. Урбанистика. 2024. Т. 3. С. 110–114. EDN: VFPIDL
11. *Андронов С.Ю., Задираха А.А., Диттер Е.Д.* Способ совместного дисперсного армирования асфальтобетона // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 1 (34). С. 14–20. EDN: MONDTE
12. *Белецкий А.В., Нироев Т.А.* Асфальтобетоны повышенной сдвигустойчивости с дисперсным армированием одно- и двухкомпонентной фиброй // Вестник Евразийской науки. 2024. Т. 16. № 5. EDN: VYFEUS. URL: <https://esj.today/PDF/26SAVN524.pdf>
13. *Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д.* Исследование изменений состояния и свойств волокон дисперсной арматуры в процессе строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 185–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196. EDN: TQJNLC
14. *Бондарев Б.А., Карасева О.В., Струрова В.А., Ливенцева А.А.* Применение фибры Dramix производства компании Бекарт в строительстве // Современные проблемы материаловедения : сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ. Липецк, 2021. С. 340–342. EDN: MCPZFQ
15. *Пахомов И.А., Абайдуллина Т.Н.* Исследование свойств асфальтобетона, модифицированного полипропиленовым волокном // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 1 (48). С. 152–156. EDN: TQKGUX
16. *Пугин К.Г., Яконцева О.В., Салахова В.К.* Использование полимерных материалов в качестве структурного элемента в составе асфальтобетона // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 4. С. 29–36. DOI: 10.15593/24111678/2021.04.04. EDN: WPMJRS
17. *Jin D., Meyer T.K., Chen S., Ampaduboateng K., Pearce J.M., You Z.* Evaluation of lab performance of stamp sand and acrylonitrile styrene acrylate waste composites without asphalt as road surface materials // Construction and Building Materials. 2022. V. 338. P. 127569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127569. EDN: VMITVO

18. *Jianmin Ma., Simon A.M.* Effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber on the fracture resistance of asphalt mixtures // Construction and Building Materials. 2022. V. 342. Part A. P. 127944. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127944. EDN: VQCWAS
19. *Пугин К.Г.* Повышение композиционной однородности асфальтобетонных смесей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2025. № 1. С. 43–51. DOI: 10.15593/24111678/2025.01.04. EDN: TYQNQH
20. *Братчун В.И., Пшеничных О.А., Ромасюк Е.А. и др.* О формировании структуры адсорбционно-сольватных слоев асфальтохризотилового вяжущего вещества на поверхности минеральных материалов дорожного асфальтобетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 1 (153). С. 114–121. EDN: VWEBYO
21. *Лукашевич В.Н.* Технология производства асфальтобетонных смесей, оптимизированная по критерию прочностных свойств асфальтобетона : специальность 05.23.08 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лукашевич Виктор Николаевич. Томск, 2001. 316 с. EDN: QDJWNB
22. *Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокшин Р.И.* Преимущества структурообразования дисперсно-армированных органоминеральных смесей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 5. С. 142–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-142-150. EDN: AVVUNO
23. *Лукашевич В.Н., Ефанов И.Н.* Технология дисперсного армирования асфальтобетонных смесей волокнистыми сорбентами, направленная на улучшение свойств битума в адсорбционном слое за счет снижения интенсивности избирательной фильтрации его компонентов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2 (35). С. 197–201. EDN: OYATIT
24. *Братчун В.И., Беспалов В.Л., Пактер М.К., Ромасюк Е.А.* Теоретико-экспериментальные принципы получения модифицированных дорожных асфальтобетонов повышенной долговечности. Донецк : ООО «НПП «Фолиант», 2020. 244 с.
25. *Дедюхин А.Ю., Булдаков С.И.* Технология дисперсного армирования асфальтобетонных смесей волокнами хризотила // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2009. № 1 (13). С. 120–124. EDN: KFPXKV
26. *Дедюхин А.Ю.* Дисперсно-армированный асфальтобетон // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2009. № 1 (13). С. 116–120. EDN: KFPXKL
27. *Ефремов С.В., Лапченко А.С.* Влияние волокна на физико-механические и реологические свойства асфальтобетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2011. № 1 (87). С. 121–127. EDN: OLYHGX
28. *Лукашевич В.Н., Власов В.А., Лукашевич О.Д., Ефанов И.Н.* Исследования изменений показателей свойств волокон дисперсной арматуры в асфальтобетонных покрытиях под воздействием природно-климатических факторов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6 (65). С. 193–200. EDN: ZWJBFH
29. *Лукашевич В.Н., Ефанов И.Н., Прокофьева Г.И., Вакс И.В.* Исследования структурно-механических свойств дисперсно-армированных органоминеральных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6 (53). С. 177–185. EDN: VAVLCJ
30. *Бусел А.В., Чистова Т.А., Наумовец А.Н.* Асфальтовяжущее на упрочняющих волокнистых компонентах // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 1. С. 106–109. EDN: YTRSOD
31. *Андронов С.Ю., Артеменко А.А., Кочетков А.В., Задирака А.А.* Влияние способа введения базальтовых волокон на физикомеханические показатели композиционных асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 71–73. EDN: ZCSKZJ
32. *Андронов С.Ю., Алферов В.И., Кочетков А.В.* Совершенствование методов введения фиброволокон в горячие и холодные асфальтобетонные смеси // Вестник Евразийской науки. 2020. № 2. EDN: ROTYCR/ URL: <https://esj.today/PDF/72SAVN220.pdf>
33. *Guo Q., Li L., Cheng Y., Jiao Y., Xu C.* Laboratory Evaluation on Performance of Diatomite and Glass Fiber Compound Modified Asphalt Mixture // Materials & Design. 2015. V. 66. P. 51–59. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.033

34. *Muhammad Fawad Rashid, Naveed Ahmad, Ahtsham Ahmed*. The effect of using steel fiber on deformation. Resistance of asphalt concrete // 2nd Conference on Sustainability in Civil Engineering (CSCE'20) Department of Civil Engineering Capital University of Science and Technology. 2021.
35. *Пшеничных О.А., Оболенская Е.В., Волошук А.В. и др.* Сравнительный анализ физико-механических свойств двух видов асбеста в качестве армирующего материала для асфальтобетонной смеси // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современные строительные материалы. 2024. Вып. 1 (165) С. 63–68. URL: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-1\(165\)/st_09_pschenichnyh_olenskaya_voloshuk_lunin_sheludyakov_zolotin.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-1(165)/st_09_pschenichnyh_olenskaya_voloshuk_lunin_sheludyakov_zolotin.pdf) (дата обращения: 19.11.2025).
36. *Xiong R., Fang J., Xu A., Guan B., Liu Z.* Laboratory Investigation on the Brucite Fiber Reinforced Asphalt Binder and Asphalt Concrete // Construction and Building Materials. 2015. V. 83. P. 44–52. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.089
37. *Zarei M., Akbarinia F., Rahmani Z., et al.* Economical and technical study on the effect of carbon fiber with high strength on hot mix asphalt (HMA) // Electronic Journal of Structural Engineering. 2020. V. 20. P. 6–12. DOI: 10.56748/ejse.20240. EDN: KTZWVK
38. *Абдуллин А.И., Емельяновичева Е.А.* Использование технического углерода в качестве добавки к дорожным битумам // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 2. С. 275–278. EDN: RWUORJ
39. *Assan M., Rashid M., Danish A., Ahmed A.* The effect of using jute fiber on deformation resistance of asphalt concrete. 2021. 6 p.
40. *Geremew A., Jemal A.* The comparative study on the performance of bamboo fiber and sugarcane bagasse fiber as modifiers in asphalt concrete production // Heliyon. 2020. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09842. EDN: NUDQPI
41. *Hui Y., Yiran W., Junfu L., Mei X., Pengrui M., Jie Ji, Zhanping Y.* Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey // Sec. Structural Materials. 2021 V. 8. 803524. DOI: 10.3389/fmats.2021.803524. EDN: CUYUOF
42. *Chen Z., Yi J., Chen Z., Feng D.* Properties of Asphalt Binder Modified by Corn Stalk Fiber // Constr. Build. Mater. 2019. V. 212. P. 225–235. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.329
43. *Abdullahi Ahmad Kabiru, Usman Nura, Masirin Mohd, Ahmed Anwar.* Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture using Recycle Polyethylene Terephthalate Fibre // Indian Journal of Science and Technology. 2016. V. 9. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107143
44. *Guo Q., Li L., Cheng Y., Jiao Y., Xu C.* Laboratory Evaluation on Performance of Diatomite and Glass Fiber Compound Modified Asphalt Mixture // Mater. Des. 2015. V. 66. P. 51–59. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.033
45. *Slebi-Acevedo C.J., Lastra-Gonzalez P., Castro-Fresno D., Bueno M.* An experimental laboratory study of fiber-reinforced asphalt mortars with polyolefin-aramid and polyacrylonitrile fibers // Construction and Building Materials. 2020. V. 248. 118622. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118622 EDN: RBRFZY
46. *Ласман И.А., Токар Н.И., Шкабаро Д.Ю. и др.* Синтетические волокна для дисперсного и пространственного армирования асфальтобетонного покрытия // Инновации в строительстве-2022 : материалы Международной научно-практической конференции, Брянск, 07–09 апреля 2022 г. Брянск : [Б. и.], 2022. С. 238–242. EDN: RSQFQW
47. *Kim M.-J., Kim S., Yoo D.-Y., Shin H.-O.* Enhancing Mechanical Properties of Asphalt Concrete Using Synthetic Fibers // Construction and Building Materials. 2018. V. 178. P. 233–243. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.070
48. *Пахомов И.А., Абайдуллина Т.Н.* Исследование свойств асфальтобетона, модифицированного полипропиленовым волокном // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 1 (48). С. 152–156. EDN: TQKGUX
49. *Андронов С.Ю.* Приготовление композиционной дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси с различными способами внесения фибры из поликарбонитрильного волокна в смесь // Современные научно-исследовательские технологии. 2016. № 4-1. С. 9–13. EDN: VVXZGX
50. *Чернов С.А., Каклюгин А.В., Никитина А.Н., Голубин К.Д.* Влияние полимерно-дисперсноармирующей добавки на эксплуатационные свойства асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2017. Вып. 12. № 6 (105). С. 654–660. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.654-660. EDN: ZASZGZ

51. Андронов С.Ю., Задираха А.А., Трофименко Ю.А. Изучение влияния способа введения ПАН волокна на качество асфальтобетона // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 1 (34). С. 20–26. EDN: ENWFQQ
52. Ефанов Н.Е., Лукашевич В.Н., Пиряев И.В. Влияние технологии дисперсного армирования асфальтобетонных смесей на процессы их структурообразования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 1 (14). С. 204–209. EDN: JUCZET
53. Русаков М.Н., Исмаилов А.М. Стирол-бутадиен-стирольные полимеры для дорожного строительства в Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. № 87. С. 1–13. DOI: 10.18720/CUBS.87.3. EDN: JUKKYD
54. Gao Y., Guo Q., Guo Y., Wu P., Meng W., Jia T. Investigation on Reinforced Mechanism of Fiber Reinforced Asphalt Concrete Based on Micromechanical Modeling // Advances in Materials Science and Engineering. 2017. Р. 1–12. DOI: 10.1155/2017/4768718
55. Черных Д.С., Стroeв Д.А., Батыров С.А. Влияние технологических параметров режима приготовления на свойства полимерно-дисперсно-армированных асфальтобетонов // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 150. EDN: YJKTED
56. Насонова И.Г., Лира С.В. Технологическая стабильность щебено-мастичных асфальтобетонных смесей, армированных синтетическим волокном // Дороги и мосты. 2024. № 2 (52). С. 321–346. EDN: AXBJSW

REFERENCE

1. Vasil'ev Yu.E., et al. Innovative Technologies in the Production of Asphalt Concrete Mixtures. Moscow: MADI, 2016. 116 p. (In Russian)
2. Ignat'ev A.A. Additives to Asphalt Concrete. Literature Review. *Izvestiya KGASU*. 2023; 1 (63): 14–30. DOI: 10.52409/20731523_2023_1_14. EDN: EXDWYX (In Russian)
3. Kotlyarskii E.V. “Durability improvement of road surfaces through the optimization of asphalt concrete structure”. DSc Abstract, Belgorod, 2012. 45 p. (In Russian)
4. Goncharova M.A., Tkacheva I.A. Strength Improvement of Asphalt Concrete Mixtures for repair of Rigid Road Structures. *Stroitel'nye materialy*. 2023; (1–2): 33–37. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-33-37 (In Russian)
5. Belyaev K.V. Improvement of asphalt concrete performance characteristics. In: *Proc. 2nd Int. Sci. Conf. ‘Basic and Applied Research of Young Scientists’*. 2018. Pp. 416–422. (In Russian)
6. Stroev D.A., Chan N.Kh., Gorelov S.V. Intensity Reduction of Plastic Strain by Fiber Reinforcement of Road Construction Materials. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011; 1 (30): 192–199. (In Russian)
7. Talantova K., Tolstenev S. Composite as steel fiber-reinforced concrete in road construction. *Avtomobil'nye dorogi*. 1999; (9): 24–26. (In Russian)
8. Pshenichnykh O.A., Pozhidaeva A.L., Mikhailyuk D.S., et al. Synthetic Fiber Reinforcement of Asphalt Concrete Mixtures. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2021; 1 (147): 80–86. (In Russian)
9. Pshenichnykh O.A., Skorik D.S. Experience in using Fiber-Reinforced Asphalt Concrete in Road Construction. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020; 1 (141): 121–127. (In Russian)
10. Ketov A.I., Pugin K.G. Improvement of Asphalt Concrete Pavement Characteristics through Reinforcement. *Khimiya. Ekhologiya. Urbanistika*. 2024; 3: 110–114. (In Russian)
11. Andronov S.Yu., Zadiraka A.A., Diter E.D. Method for Joint Fiber Reinforcement of Asphalt Concrete. *Tekhnicheskoe regulirovaniye v transportnom stroitel'stve*. 2019; 1 (34): 14–20. (In Russian)
12. Beletskii A.V., Nirov T.A. Asphalt Concrete with Increased Shear Resistance with Dispersed Reinforcement of Single- and Two-Component Fiber. *Vestnik evraziiskoi nauki*. 2024; 16 (5). Available: <https://esj.today/PDF/26SAVN524.pdf> (In Russian)
13. Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Modification of Conditions and Properties of Dispersed Reinforcing Fiber During Construction and Operation of Asphalt Concrete Pavements. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (3): 185–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196. EDN: TQJNLC (In Russian)

14. Bondarev B.A., Karaseva O.V., Sturova V.A., Liventseva A.A. The use of dramix fibre manufactured by bekaert in construction. In: *Proc. 2nd All-Russ. Sci. Conf. 'Modern Problems of Materials Science'*. Lipetsk, 2021. Pp. 340–342. EDN: MCPZQ (In Russian)
15. Pakhomov I.A., Abaidullina T.N. Properties of Asphalt Concrete Modified with Polypropylene Fibre. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; 1 (48): 152–156. (In Russian)
16. Pugin K.G., Yakontseva O.V., Salakhova V.K. Polymer Materials as a Structural Element in Asphalt Concrete. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2021; (4): 29–36. (In Russian)
17. Jin D., Meyer T.K., Chen S., AmpaduBoateng K., Pearce J.M., You Z. Evaluation of Lab Performance of Stamp Sand and Acrylonitrile Styrene Acrylate Waste Composites without Asphalt as Road Surface Materials. *Construction and Building Materials*. 2022; 338: 127569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127569. EDN: VMITVO
18. Jianmin Ma, Simon A.M. Effect of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Fiber on the Fracture Resistance of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*. 2022; 342 (5): 127944. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127944
19. Pugin K.G. Improvement of Compositional Uniformity of Asphalt Concrete Mixtures. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2025; (1): 43–51. DOI: 10.15593/24111678/2025.01.04. EDN: TYQNQH (In Russian)
20. Bratchun V.I., Pshenichnykh O.A., Romasyuk E.A., et al. Structure Formation of Adsorption-Solvate Layers of Asphalt-Chrysotile Binder on Surface of Mineral Materials of Road Asphalt Concrete. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2022; 1(153): 114–121. EDN: VWEBYO (In Russian)
21. Lukashevich V.N. "Asphalt concrete mixture technology optimised according to its strength properties". DSc Thesis. Tomsk, 2001. 316 p. (In Russian)
22. Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Structure Formation of Dispersion Hardened Organomineral Mixtures. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (5): 142–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-5-142-150. EDN: AVVUNO (In Russian)
23. Lukashevich V.N., Efanov I.N. Fiber reinforcement Technology of Asphalt Concrete Mixtures with Fibrous Sorbents for Improving Bitumen Properties in Adsorption Layer by Reducing Selective Filtration Intensity of its Components. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; 2 (35): 197–201. EDN: OYATIT (In Russian)
24. Bratchun V.I., Bespalov V.L., Pakter M.K., Romasyuk E.A. Theoretical and Experimental Principles for Producing Modified Road Asphalt Concrete with Increased Durability. Donetsk: "Foliant", 2020. 244 p. (In Russian)
25. Dedyukhin A.Yu., Buldakov S.I. Chrysotile Fiber Reinforcement of Asphalt Concrete Mixtures. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2009; 1 (13): 120–124. EDN: KFPXKV (In Russian)
26. Dedyukhin A.Yu. Fiber-Reinforced Asphalt Concrete. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2009; 1 (13): 116–120. (In Russian)
27. Efremov S.V., Lapchenko A.S. Fibre Effect on Physical, Mechanical and Rheological Properties of Asphalt Concrete. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2011; 1 (87): 121–127. EDN: OLYHGX (In Russian)
28. Lukashevich V.N., Vlasov V.A., Lukashevich O.D., Efanov I.N. Fiber Reinforcement Properties of Asphalt Pavements Under Natural and Climatic Conditions. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; 6 (65): 193–200. EDN: ZWJBFH (In Russian)
29. Lukashevich V.N., Efanov I.N., Prokof'eva G.I., Vaks I.V. Investigations of Structural-Mechanical Properties of Fiber Reinforced Organo-Mineral Materials. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; 6 (53): 177–185. (In Russian)
30. Busel A.V., Chistova T.A., Naumovets A.N. Asphalt Binders with Reinforcing Fibrous Components. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2014; (1): 106–109. EDN: YTRSOD (In Russian)
31. Andronov S.Yu., Artemenko A.A., Kochetkov A.V., Zadiraka A.A. Influence of Basalt Fiber Addition on Physical and Mechanical Properties of Composite Asphalt Concrete Mixtures. *Stroitel'nye materialy*. 2017; (7): 71–73. (In Russian)

32. *Andronov S.Yu., Alferov V.I., Kochetkov A.V.* Improvement of Methods of Fiber Addition to Hot and Cold Asphalt Con-crete Mixtures. *Vestnik Evraziiskoi nauki.* 2020; (2). Available: <https://esj.today/PDF/72SAVN220.pdf> (In Russian)
33. *Guo Q., Li L., Cheng Y., Jiao Y., Xu C.* Laboratory Evaluation on Performance of Diatomite and Glass Fiber Compound Modified Asphalt Mixture. *Materials and Design.* 2015; 66: 51–59. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.033
34. *Muhammad Fawad Rashid, Naveed Ahmad, Ahtsham Ahmed.* The effect of using steel fiber on deformation resistance of asphalt concrete. In: *Proc 2nd Conf. on Sustainability in Civil Engineering.* 2021.
35. *Pshenichnykh O.A., Obolenskaya E.V., Voloshchuk A.V., et al.* Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Two Asbestos Types as Reinforcing Material for Asphalt Concrete Mix. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury.* 2024; 1 (165): 63–68. Available: [https://donna.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-1\(165\)/st_09_pschenichnyh_obolenskaya_voloshuk_lunin_sheludyakov_zolotin.pdf](https://donna.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-1(165)/st_09_pschenichnyh_obolenskaya_voloshuk_lunin_sheludyakov_zolotin.pdf) (accessed November 19, 2025). (In Russian)
36. *Xiong R., Fang J., Xu A., Guan B., Liu Z.* Laboratory Investigation on the Brucite Fiber Reinforced Asphalt Binder and Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials.* 2015; 83: 44–52. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.089
37. *Zarei M., Akbarinia F., Rahmani Z., et al.* Economical and Technical Study on the Effect of Carbon Fiber with High Strength on Hot Mix Asphalt (HMA). *Electronic Journal of Structural Engineering.* 2020; 20: 6–12. EDN: KTZWVK
38. *Abdullin A.I., Emel'yanycheva E.A.* Use of Technical Carbon as an Additive to Road Bitumen. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 2014; (2): 275–278. (In Russian)
39. *Assan M., Rashid M., Danish A., Ahmed A.* The Effect of Using Jute Fiber on Deformation Resistance of Asphalt Concrete. 2021; 1–6.
40. *Geremew A., Jemal A.* The Comparative Study on the Performance of Bamboo Fiber and Sugarcane Bagasse Fiber as Modifiers in Asphalt Concrete Production. *Heliyon.* 2020; 1–8. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09842
41. *Hui Y., Yiran W., Junfu L., Mei X., Pengrui M., Jie Ji, Zhanping Y.* Review on Applications of Lignin in Pavement Engineering: A Recent Survey. *Frontiers in Materials.* 2021; 8: 803524. DOI: 10.3389/fmats.2021.803524
42. *Chen Z., Yi J., Chen Z., Feng, D.* Properties of Asphalt Binder Modified by Corn Stalk Fiber. *Journal of Construction and Building Materials.* 2019; 212: 225–235. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.329
43. *Abdullahi Ahmad Kabiru, Usman Nura, Masirin Mohd, Ahmed Anwar.* Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture using Recycle Polyethylene Terephthalate Fibre. *Indian Journal of Science and Technology.* 2016; 9. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107143
44. *Guo Q., Li L., Cheng Y., Jiao Y., Xu C.* Laboratory Evaluation on Performance of Diatomite and Glass Fiber Compound Modified Asphalt Mixture. *Materials & Design.* 2015; 66: 51–59. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.033.
45. *Slebi-Acevedo C.J., Lastra-Gonzalez P., Castro-Fresno D., Bueno M.* An Experimental Laboratory Study of Fiber-Reinforced Asphalt Mortars with Polyolefin-Aramid and Polyacrylonitrile Fibers. *Construction and Building Materials.* 2020; 248, 118622. EDN: RBRFZY
46. *Lasman I.A. Tokar N.I., Shkabaro D.Yu., et al.* Synthetic fibres for dispersed and spatial reinforcement of asphalt concrete pavement. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Innovations in Construction-2022'.* Bryansk, 2022. Pp. 238–242. (In Russian)
47. *Kim M.-J., Kim S., Yoo D.-Y., Shin H.-O.* Enhancing Mechanical Properties of Asphalt Concrete using Synthetic Fibers. *Construction and Building Materials.* 2018; 178: 233–243. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.070
48. *Pakhomov I.A., Abaidullina T.N.* Asphalt Concrete Properties Modified with Polypropylene Fibre. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov.* 2015; 1 (48): 152–156. EDN: TQKGUX (In Russian)
49. *Andronov S.Yu.* Preparation of Composite Fiber-Reinforced Asphalt Concrete Mixture using Various Methods of Introducing Polyacrylonitrile Fibre into Mixture. *Sovremennye naukovedemkie tekhnologii.* 2016; (4-1): 9–13. EDN :VVXZGX (In Russian)
50. *Chernov S.A., Kaklyugin A.V., Nikitina A.N., Golyubin K.D.* Influence of Polymer-Disperse Reinforcing Additives on Operational Properties of Asphalt Concrete. *Vestnik MGSU.* 2017; 12 (6 (105)): 654–660. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.654-660 (In Russian)

51. Andronov S.Yu., Zadiraka A.A., Trofimenko Yu.A. Influence of Introducing PAN Fibre on Asphalt Concrete Quality. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2019; 1 (34): 20–26. EDN: ENWFQQ (In Russian)
52. Efanov N.E., Lukashevich V.N., Piryaev I.V. Influence of Dispersed Reinforcement on Structure Formation in Asphalt Concrete Mixtures. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007; 1 (14): 204–209. EDN: JUCZET (In Russian)
53. Rusakov M.N., Ismailov A.M. Styrene-Butadiene-Styrene Polymers for Road Construction in the Russian Federation. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii*. 2020; (87): 1–13. DOI: 10.18720/CUBS.87.3 (In Russian)
54. Gao Y., Guo Q., Guo Y., Wu P., Meng W., Jia T. Investigation on Reinforced Mechanism of Fiber Reinforced Asphalt Concrete Based on Micromechanical Modeling. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017; 1–12. DOI: 10.1155/2017/4768718
55. Chernykh D.S., Stroev D.A., Batyrov S.A. Influence of Process Parameters on Polymer Fiber-Reinforced Asphalt-Concrete Properties. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016; 4 (43): 150. EDN: YJKTED (In Russian)
56. Nasonova I.G., Lira S.V. Technological Stability of Crushed Stone-Mastic Asphalt Concrete Mixtures Reinforced with Synthetic Fibre. *Dorogi i mosty*. 2024; 2 (52): 321–346. EDN: AXBJSW (In Russian)

Сведения об авторах

Лукашевич Виктор Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vnluc@yandex.ru

Лукашевич Ольга Дмитриевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, odluk@yandex.ru

Authors Details

Viktor N. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vnluc@yandex.ru

Olga D. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, odluk@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 05.11.2025
Одобрена после рецензирования 18.11.2025
Принята к публикации 20.11.2025

Submitted for publication 05.11.2025
Approved after review 18.11.2025
Accepted for publication 20.11.2025

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 272–281.

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 (6): 272–281.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.059.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-272-281

EDN: LUIIPJ

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ГЛАВНЫХ БАЛОК МОСТОВ С ПРЕДНАПРЯЖЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА УСИЛЕНИЯ

Дмитрий Николаевич Смердов¹, Максим Олегович Ящук²

¹Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия

²Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Актуальность работы обусловлена наличием на сети автомобильных дорог России большого парка мостовых сооружений с железобетонными пролетными строениями, рассчитанными на устаревшие нормативные нагрузки. Эти конструкции подвержены физическому износу, накоплению дефектов и моральному старению, что снижает их несущую способность и требует эффективных методов усиления.

Цель работы – обоснование методики расчета несущей способности железобетонных главных балок мостов, усиленных предварительно напряженными полимерными композиционными материалами (ПКМ), для восстановления и повышения их эксплуатационных характеристик.

Материалы и методы исследования включают анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) усиленного элемента в три стадии: от действия постоянных нагрузок, от преднапряжения ПКМ и в предельном состоянии. Анализ основан на методе предельных состояний с использованием нелинейных деформационных моделей бетона и арматуры. Расчетный подход верифицирован комплексными лабораторными испытаниями.

Результаты. Рассмотрены три стадии напряженно-деформированного состояния изгибающегося железобетонного элемента. Первая стадия соответствует действию усилий на главные балки от полных расчетных постоянных нагрузок, вторая стадия – действие усилий от предварительного напряжения полимерных композиционных материалов; третья стадия соответствует предельному состоянию с учетом напряженно-деформированного состояния конструкций первой и второй стадий. Показаны эпюры напряжений в разных стадиях напряженно-деформированного состояния сечения с учетом усиления балочного элемента.

Ключевые слова: углеродное волокно, преднапряженные полимерные композиционные материалы, несущая способность, деформация, напряженно-деформированное состояние, предел прочности, балка

Для цитирования: Смердов Д.Н., Ящук М.О. Обоснование методики расчета железобетонных главных балок мостов с преднапряжением композитными материалами в качестве материала усиления // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 272–281. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-272-281. EDN: LUIIPJ

ORIGINAL ARTICLE

CALCULATION TECHNIQUE OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE BEAMS REINFORCED BY PRESTRESSED COMPOSITE MATERIALS

Dmitriy N. Smerdov¹, Maxim O. Yashchuk²

¹*Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia*

²*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia*

Abstract. The paper provides a rationale for the calculation technique of concrete beams reinforced by prestressed composite materials. Three stages of the stress-strain state of a bending reinforced concrete element are considered. The first stage includes forces affecting the main beams from full design constant loads, the second stage is the action of forces from the preliminary stress of polymer composite materials; the third stage is the ultimate state taking into account the stress-strain state of the two previous structures. Stress-strain curves are obtained for different stages, taking into account the beam reinforcement.

Purpose: Substantiation of the calculation technique for the bearing capacity of reinforced concrete beams reinforced with prestressed polymer composites for the restoration and improvement of their performance characteristics.

Design/methodology/approach: The analysis of numerical models of elements under loads and comparison of the obtained results with the laboratory experimental data. The limit-state-based analysis utilizes nonlinear deformation models of concrete and reinforcement. The calculation technique is verified by the laboratory tests.

Research findings: Theoretical and experimental studies substantiate the proposed calculation technique for reinforced concrete bridge beams reinforced with prestressed composite materials.

Practical implications: The calculation technique shows a high accuracy in comparison with laboratory research.

Originality/value: Previously, there is no calculation technique for reinforced concrete beams reinforced with prestressed composite materials.

Keywords: carbon fiber, prestressed polymer composite materials, load-bearing capacity, deformation, stress-strain state, tensile strength, beam

For citation: Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Calculation Technique of Reinforced Concrete Bridge Beams Reinforced by Prestressed Composite Materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2025; 27 (6): 272–281. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-272-281. EDN: LUIPJ

На сети автомобильных дорог Российской Федерации насчитывается более 45 000 мостов [16]. Пролетные строения выполнены преимущественно из железобетона, но также существуют металлические и сталежелезобетонные. Наиболее часто встречающиеся конструкции главных балок железобетонных пролётных строений автодорожных мостовых сооружений: выпуск 56 инв. № 147/1, выпуск 56 (д) и серия 3.503.1-81. Представленные типы пролётных строений имеют ограниченный срок службы, не превышающий 35–40 лет. Следует обозначить, что данные главные балки пролётных строений запроектированы под старые проектные нагрузки: Н-30 – для выпуска соответственно 56 и 56 (д) и нагрузки А-11 – для серии 3.503.1-81. Основные недостатки данных нагрузок в сравнении с актуальной А-14 – затруднительный пропуск сверхнормативной нагрузки, сниженная грузоподъёмность и моральный износ конструк-

ций. Наиболее распространенные типы поперечных сечений главных балок пролетных строений мостов – это балки таврового поперечного сечения (рис. 1).

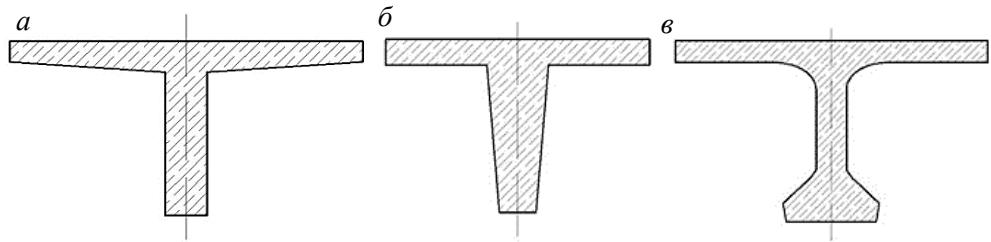


Рис. 1. Наиболее распространенные типы пролетных строений, запроектированные под старые нагрузки:

а – выпуск 56 инв. № 147/1; б – выпуск 56 (д); в – серия 3.503.1-81 [4]

Fig. 1. The most common types of span structures designed for former load values:
a – issue 56 inv. No. 147/1; b – issue 56 (d); c – series 3.503.1-81 [4]

Пролетные строения мостов в процессе эксплуатации подвергаются физическому износу от интенсивной подвижной и тяжеловесной нагрузок, ударов негабаритных грузов, техногенных и природно-климатических воздействий – у балок пролетных строений появляются различные неисправности и дефекты [1–6], природа появления которых более подробно описана ниже.

1. Разрушение гидроизоляции проявляется в обводнении конструкций главных балок пролетного строения с последующим образованием коррозии на боковых гранях балки и ее нижнем поясе.

2. Удары от негабаритного транспорта и расположенных на нем грузов разрушают нижний пояс балок (образование сколов, продергивание арматурных стержней с одновременным выключением их из работы в зоне растяжения).

3. Отсутствие или низкое качество капитального ремонта является причиной устройства дорожной одежды с толщиной, превышающей нормативную (рис. 2).

4. Выщелачивание, характерные трещины, химическая коррозия с обнажением арматурного слоя, а также обрушение защитного слоя бетона связаны не только с разрушением гидроизоляции, но и с неправильным водоотводом с элементов мостового сооружения.

5. Дефекты и нарушение работоспособности деформационных швов отрицательно влияют на трещиностойкость балочных элементов моста: при их смещении или нарушении целостности может образовываться система трещин с раскрытием более 0,3–0,4 мм.

6. Раковины на поверхности главных балок пролетного строения – это один из технологических недостатков при бетонировании конструкции, в будущем непосредственно влияющий на снижение надежности работы конструкции.

7. Карбонизация поверхности бетона приводит к снижению его щелочности и, как следствие, к ускоренной коррозии арматуры.

Таким образом, данные дефекты и неисправности отрицательно влияют на несущую способность и со временем могут приводить мостовые сооружения к аварийному техническому состоянию с угрозой обрушения пролетных кон-

структур мостов на участках автомобильных дорог. Эффективным способом восстановления несущей способности главных балок железобетонных пролетных строений мостов является метод усиления их полимерными композиционными материалами [7–15]. Дальнейшее развитие данного направления было связано с применением предварительно напряженных полимерных композиционных материалов – углеродных ламелей (преднапряженные ПКМ). При этом для использования преднапряженных ПКМ требовалась разработка технологии преднапряжения ламелей с использованием специальных устройств [13–16], а также проведение лабораторных экспериментов, которые были реализованы [11]. Следующий шаг, необходимый для полноценного внедрения в практику строительства мостов технологии преднапряжения ПКМ, – это разработка методики расчета главных балок железобетонных пролетных строений мостов, усиленных преднапряженными ПКМ, которая представлена ниже.

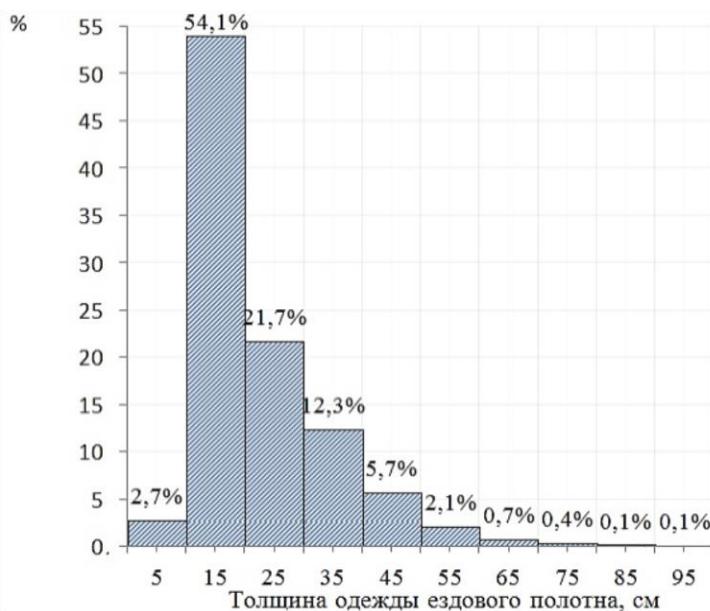


Рис. 2. Завышенная толщина дорожной одежды на автодорожных мостах [4]
Fig. 2. Excessive thickness of the road pavement on bridges

Методика расчета подразумевает рассмотрение трех стадий напряженно-деформированного состояния изгибающего железобетонного элемента. Первая стадия соответствует действию усилий на главные балки от полных расчетных постоянных нагрузок, вторая стадия – действие усилий от предварительного напряжения полимерных композиционных материалов, третья стадия соответствует предельному состоянию с учетом напряженно-деформированного состояния конструкций первой и второй стадий.

На рис. 3 показано расположение внутренних усилий и формы эпюр нормальных напряжений в сжатой и растянутой зоне бетона для трех стадий напряженно-деформированного состояния для сечения.

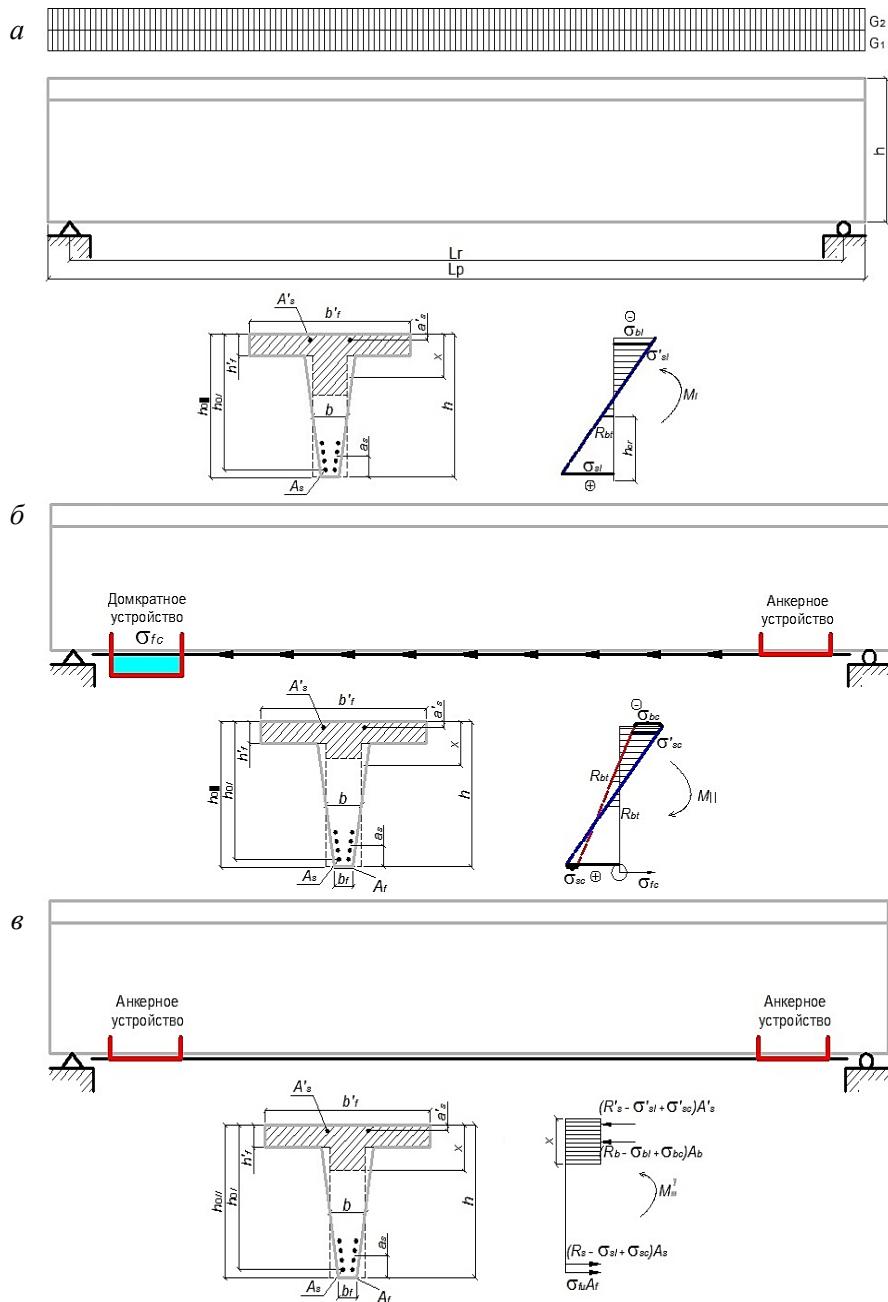


Рис. 3. Стадии работы изгибаемого железобетонного элемента:
 а – стадия № 1 (нагрузка от собственного веса балки); б – стадия № 2 (стадия преднапряжения ПКМ, установленного на нижней грани балочного элемента); в – стадия № 3 (предельное состояние, полное включение в работу с балочным элементом материала ПКМ)

Fig. 3. Performance stages of a flexural reinforced concrete element:
 a – stage 1 (dead load); b – prestress stage 2 (polymer composite installed on the lower beam edge); c – stage 3 (ultimate state, full engagement of the polymer composite)

При расчете усиленных железобетонных конструкций следует ограничивать напряжения в полимерном композиционном материале предельной величиной, что предотвращает возможность разрушения бетонного основания, на которое нанесен композиционный материал, или его возможное отслоение по контакту «клей-бетон». Значение предельных напряжений в материале усиления, расположенному на нижней грани балки, следует определять по формуле

$$\sigma_{fu} = k_s \sqrt{\frac{R_b E_{fi} b_f}{\sum t_f}} \leq \gamma_c (R_{ft} - \sigma_{fc}), \quad (1)$$

где k_s – коэффициент, учитывающий тип конструкции усиления; b_f – единичная ширина полосы материала усиления; t_f – толщина одного слоя композиционного материала, мм; E_f – модуль упругости композиционного материала, МПа.

Нормальные напряжения σ_{bl} , σ_{sl} , σ'_{sl} , σ_{bc} , σ_{sc} и σ'_{sc} определяются с использованием нелинейной деформационной модели. Принятая в расчетах диаграмма деформирования бетона приведена на рис. 4. На участке диаграммы 0–1 зависимость между напряжениями и деформациями в бетоне принята по формуле $\sigma_b = E_b \varepsilon_b (1 - \omega)$, а на участке 0–2 – по формуле $\sigma_b = E_b \varepsilon_b$.

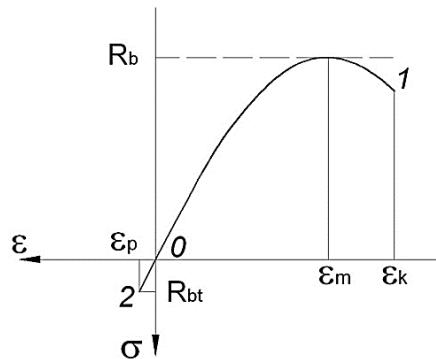


Рис. 4. Диаграмма деформирования бетона при одноосном сжатии и растяжении
Fig. 4. Stress-strain curve of concrete at uniaxial compression and tension

Функция пластиичности для бетона принята в виде

$$\omega = \frac{E_b \varepsilon_b}{4 R_b}, \quad (2)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию.

Диаграмма деформирования рабочей арматуры принята в виде диаграммы Прандтля (рис. 4). На участке диаграммы 0–1 напряжения в арматуре определяются по закону Гука [1], участок 1–2 соответствует площадке текучести, для которой $\sigma_s = R_s$ (рис. 5).

Относительные деформации в нормальном сечении элемента определяются по формуле

$$\varepsilon = \frac{M_\omega + M}{E_b I_{\text{red}}} y, \quad (3)$$

где M_{ω} – внутренний момент в нормальном сечении элемента от действия внешних сил; M – внешний изгибающий момент; I_{red} – приведенный момент инерции нормального сечения; y – координата по высоте сечения, начало которой расположено на уровне нейтральной оси.

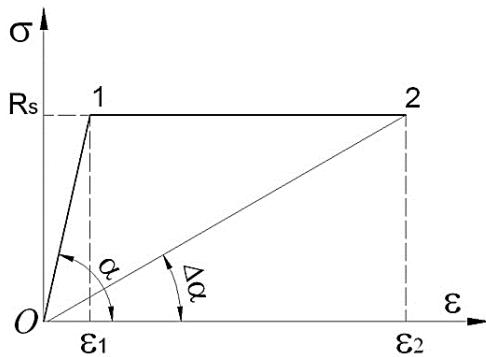


Рис. 5. Диаграмма деформирования арматуры
Fig. 5. Reinforcement strain diagram

Внутренний момент в нормальном сечении определяется по формуле

$$M_{\omega} = \sum_{i=1}^n \int_A \sigma_i^b y_i^b dA + \sum_{k=1}^m \sigma_k^s y_k^s A_k^s, \quad (4)$$

где n – количество слоев бетона в нормальном сечении с различными прочностными и деформативными характеристиками; m – количество стержней рабочей арматуры; A – площадь нормального сечения; A_k^s – площадь поперечного сечения k -го стержня рабочей арматуры.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных испытаний [9, 11] создано обоснование инженерной методики расчета преднапряженных изгибаемых элементов по определению несущей способности усиленных железобетонных элементов мостов.

Методика расчета преднапряженных ПКМ изгибаемых железобетонных элементов основана на методе предельных состояний и учитывает три стадии напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых главных балок железобетонных пролетных строений автодорожных мостов, подвергаемых усилинию предварительно напряженными ПКМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бокарев С.А., Власов Г.М., Неровных А.А., Смердов Д.Н. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2 (35). С. 222–229.
- Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 10 (622). С. 63–74.

3. Бокарев С.А., Устинов В.П., Яшинов А.Н., Смердов Д.Н. Усиление пролетных строений с использованием композитных материалов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 30–31.
4. Бокарев С.А., Яцук М.О. Усиление железобетонных пролетных строений мостов преднапряженными полимерными композиционными материалами // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1 (61). С. 98–107. EDN: VTFJPP
5. Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 50–55.
6. Неволин Д.Г., Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Методика расчета изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерными композиционными материалами // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 98–101.
7. Неволин Д.Г., Смердов М.Н., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных конструкций горнотехнических зданий и сооружений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 8. С. 138–142.
8. Плевков В.С., Балдин И.В., Невский А.В. К определению расчетных напряжений в стальной и углекомпозитной арматуре нормальных сечений железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 96–113.
9. Смердов Д.Н., Соловьев Л.Ю., Яцук М.О., Хамидуллина Н.В. Контроль усиления элементов мостов // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 8. С. 22–23. EDN: YFEGHP
10. Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов // Науковедение : интернет-журнал. 2017. Т. 9. № 1. С. 34.
11. Смердов Д.Н., Яцук М.О. Экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 72–83. EDN: EBFIJY
12. Яцук М.О., Кобелев К.В. Особенности работы устройств для усиления конструкций железобетонных мостов с применением полимерных композиционных материалов // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2016) : труды Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. Т. 4. С. 142–145. EDN: XWFVIZ
13. Яцук М.О. Программа лабораторных исследований железобетонных балок, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 3. С. 158–170. EDN: ZITQSD
14. Martynuk I., Popov O., Yashchuk M., Opatskikh A. Comparative analysis of methods for calculating the load capacity of a metal bridge span // International scientific siberian transport forum TRANSSIBERIA. 2021. V. 2. P. 529–537. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_59. EDN: IBWAHF
15. Klementev A.O., Smerdov D.N. Indicators of Reliability of Artificial Structures with Elements Made of Polymer Composite Materials at all Stages of their Life Cycle on the Basis of Risk Assessment // Transportation Research Procedia. 2017. V. 20. P. 624–629.
16. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Reinforced Concrete Elements Strengthened by Pre-stressed Fibre-reinforced Polymer (FRP) // Transportation Research Procedia. 2021. V. 54. P. 157–165.

REFERENCES

1. Bokarev S.A., Vlasov G.M., Nerovnykh A.A., Smerdov D.N. Composite Material Reliability for Reinforcing Bridge Concrete Elements. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; 2 (35): 222–229. (In Russian)
2. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Methodology for calculating the strength of sections of operated reinforced concrete spans reinforced with composite materials. *Izvestiya vysших uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2010; 10 (622): 63–74. (In Russian)
3. Bokarev S.A., Ustinov V.P., Yashnov A.N., Smerdov D.N. Strengthening Spans Using Composite Materials. *Path and track management*. 2008; (6): 30–31. (In Russian)

4. Bokarev S.A., Yashchuk M.O. Reinforcement of Concrete Bridge Spans with Prestressed Polymer Composite Materials. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2016; 1 (61): 98–107. EDN: VTFJPP (In Russian)
5. Klementyev A.O., Smerdov D.N., Smerdov M.N. Strength and Deformability of Bending Reinforced Concrete Elements in Compressed and Tensile Zone with Non-Metallic Composite Reinforcement. *Transport of the Urals*. 2014; (4 (43)): 50–55. (In Russian)
6. Nevolin D.G., Klementyev A.O., Smerdov D.N., Smerdov M.N. Calculation method for bending concrete elements reinforced with polymer composite materials. *Transport Urala*. 2015; 3 (46): 98–101. (In Russian)
7. Nevolin D.G., Smerdov M.N., Smerdov D.N. Load-Bearing Capacity of Reinforced Concrete Structures of Mining Buildings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2015; (8): 138–142. (In Russian)
8. Plevkov V.S., Baldin I.V., Nevsky A.V. Estimated Stresses in Steel and Carbon Reinforced Composite Rebar of Normal Sections in Concrete Structures. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; 1 (60): 96–113. (In Russian)
9. Smerdov D.N., Soloviev L.Yu., Yashchuk M.O., Khamidullina N.V. Reinforcement Control of Bridge Elements. In: *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2022; (8): 22–23. EDN: YFEGHP (In Russian)
10. Smerdov D.N., Klementyev A.O. Strength Analysis of Sections Normal to Longitudinal Axis of Concrete Elements Reinforced with Metal and Polymer Composites using Nonlinear Deformation Model of Materials. *Naukovedenie: internet-zhurnal*. 2017; 9 (1): 34. (In Russian)
11. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Load-Bearing Capacity of Concrete Elements Reinforced with Prestressed Polymer Composite Materials. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2019; 3 (55): 72–83. EDN: EBFIJY (In Russian)
12. Yashchuk M.O., Kobelev K.V. Operation of devices for structural reinforcement of concrete bridges with polymer composites. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Transport: Science, Education, Production'*, vol. 4. Rostov-on-Don, 2017. Pp. 142–145. EDN: XWFVIZ (In Russian)
13. Yashchuk M.O. Laboratory Research Program for Concrete Beams Reinforced with Prestressed Polymer Composites. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2017; (3): 158–170. EDN: ZITQSD (In Russian)
14. Martynyuk I., Popov O., Yashchuk M., Opatskikh A. Comparative Analysis of Methods for Calculating the Load Capacity of a Metal Bridge Span. In: *International Scientific Siberian Transport Forum TRANSSIBERIA*, vol. 2. 2021. Pp. 529–537. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_59. EDN: IBWAHF
15. Klementev A.O., Smerdov D.N. Indicators of Reliability of Artificial Structures with Elements Made of Polymer Composite Materials at all Stages of their Life Cycle on the Basis of Risk Assessment. *Transportation Research Procedia*. 2017; 20: 624–629.
16. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Reinforced Concrete Elements Strengthened by Pre-stressed Fibre-Reinforced Polymer (FRP). *Transportation Research Procedia*. 2021; 54: 157–165.

Сведения об авторах

Смердов Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, DNSmerdov@mail.ru

Ящук Максим Олегович, ст. преподаватель, Ростовский государственный университет путей сообщения, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, maxum1986@gmail.com

Authors Details

Dmitriy N. Smerdov, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk St., 630049, Novosibirsk, Russia, DNSmerdov@mail.ru

Maxim O. Yashchuk, Senior Lecturer, Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 344038, Rostov-on-Don, Russia, maxum1986@gmail.com

Вклад авторов

Смердов Д.Н. – концепция теоретического исследования, общее руководство работой, методология, проверка и утверждение выводов, редактирование финального текста.

Ящук М.О. – сбор и систематизация литературных источников, проведение анализа данных, подготовка исходного текста рукописи, оформление списка литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Smerdov D.N. – conceptualization, supervision, methodology, writing–review and editing.

Yashchuk M.O. – literature, data analysis, writing–original draft preparation.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025

Submitted for publication 27.10.2025

Одобрена после рецензирования 18.11.2025

Approved after review 18.11.2025

Принята к публикации 18.11.2025

Accepted for publication 18.11.2025

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

CONSTRUCTION AND URBAN ECOLOGICAL SECURITY

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 282–295.

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 (6): 282–295.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 543.423.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-282-295

EDN: GBAQZP

ЭКОМОНИТОРИНГ ТЕРРИТОРИИ ПАРАБЕЛЬСКОГО РАЙОНА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

**Владимир Ильич Отмахов¹, Юрий Сергеевич Саркисов²,
Ольга Александровна Зубкова²**

¹Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. Экологическая архитектура является новым направлением в строительстве и освоении урбанизированных территорий, нацеленным на гармоничное сочетание социальных и экологических потребностей человека. Одной из основных задач экологической архитектуры является создание комфортной среды обитания, что соответствует приоритетным направлениям государственной политики Российской Федерации.

Цель исследования – оценка экологического состояния территории Парабельского района Томской области, являющегося крупным нефтегазодобывающим регионом, с использованием биоиндикационных методов.

Методы. В работе применен эмиссионный спектральный анализ с использованием спектрометра «Гранд» с многоканальным анализатором эмиссионных спектров (МАЭС), полихроматор «Роуланда» и генератор «Везувий-3» (РФ), программное обеспечение «Атом».

Результаты. Установлены общие закономерности накопления и распределения химических элементов в объектах животного и растительного происхождения как индикаторов экологического состояния окружающей среды исследуемого региона. Проведена сравнительная оценка концентраций тяжелых металлов относительно нормативных по-

казателей – предельно допустимых концентраций – и фоновых (референтных) значений. Рассчитаны коэффициенты концентрирования и биохимической активности для ряда видов растительности, подтверждающие их индикаторную роль в мониторинге экологического состояния среды.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о локальном техногенном загрязнении территории, обусловленном деятельностью нефтегазодобывающего комплекса. На основе результатов предложены рекомендации по реализации комплекса природоохранных мероприятий, направленных на снижение антропогенной нагрузки и улучшение качества среды обитания, что является необходимым условием обеспечения экологической безопасности в градостроительной и инфраструктурной деятельности на рассматриваемой территории.

Ключевые слова: экомониторинг, экологическая архитектура, комфортная среда обитания, индикаторы, тяжелые металлы, дуговой атомно-эмиссионный спектральный анализ, коэффициенты биохимической активности, методики выполнения измерений

Для цитирования: Отмаков В.И., Саркисов Ю.С., Зубкова О.А. Экомониторинг территории Парабельского района Томской области // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 282–295. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-282-295. EDN: GBAQZP

ORIGINAL ARTICLE

ECOLOGICAL MONITORING OF PARABELSKY URBAN ZONE OF THE TOMSK REGION

Vladimir I. Otmakhov¹, Yuri S. Sarkisov², Olga A. Zubkova²

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Ecological monitoring is a new approach to the construction and development of urban areas, focused on urban zone and city planning, combining satisfaction of both social and environmental needs. One of the main goals of ecological monitoring is the creation of ecologically clean natural zones using modern technologies and high-quality materials.

Purpose: The aim of this work is to evaluate the ecological state in the Parabelsky urban zone of the Tomsk region, which is a main oil and gas producing region.

Methodology: A Grand spectrometer with a multichannel emission spectrum analyzer is used in combination with a Rowland polychromator and a Vesuvius-3 high-frequency generator with Atom software.

Research findings: The content of key elements is detected in animals and plants and demonstrate their impact on the environment. It is shown that a set of measures to eliminate negative causes of the environmental pollution can improve the environmental situation in the urban zone.

Value: The data obtained indicate to a localized man-made pollution caused by the oil and gas production complex. Based on the results, recommendations are proposed for the implementation of a set of environmental measures aimed at reducing anthropogenic load and improving the quality of the habitat, which is a prerequisite for the environmental safety in urban development and infrastructure activities in this urban area.

Keywords: ecological monitoring, comfortable living environment, indicator, animals and plants, heavy metal, atomic emission spectroscopy, biochemical activity coefficient, measurement methods

For citation: Otmakhov V.I., Sarkisov Yu.S., Zubkova O.A. Ecological Monitoring of Parabelsky Urban Zone of the Tomsk Region. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo

архитектурно-строительного университета – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 282–295. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-282-295. EDN: GBAQZP

В настоящее время одной из наиболее острых экологических проблем является загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами – высокотоксичными элементами, способными к биоаккумуляции и длительному сохранению в биосфере. Тяжелые металлы оказывают негативное влияние на все компоненты экосистемы, включая воду, почву, объекты растительного и животного происхождения [1–15].

Целью работы является экомониторинг территории Парабельского района Томской области – региона, играющего значимую роль в нефтегазовом секторе Томской области. На его территории развиты лесозаготовка, добыча полезных ископаемых (нефть, газ, торф), ведется сельское и промысловое хозяйство. Это обеспечивает экономическое развитие всей области, но в то же время создает потенциальные экологические риски.

Природные условия района – равнинный рельеф, высокая заболоченность, кислые почвы и холодный климат – создают предпосылки для накопления загрязняющих веществ в окружающей среде.

В рамках исследования в качестве индикаторных объектов выбраны широко распространенные в Парабельском районе представители местной флоры и фауны, обладающие высокой чувствительностью к изменениям качества среды и способностью к накоплению токсичных элементов. К такого рода маркерам относятся лекарственные растения, ягоды и грибы, традиционно используемые населением в пищу и народной медицине. Дополнительно в качестве биоиндикаторов использованы волосы человека и чешуйчатый покров рыб – ткани, хорошо адсорбирующие тяжелые металлы из атмосферного воздуха, воды, почвы.

Методика исследования

Модельная схема пробоподготовки исследуемых объектов включала: высушивание, обезжиривание (при необходимости), измельчение и озоление при $(450 \pm 50)^\circ\text{C}$ до постоянной массы, необходимое для полного удаления органической составляющей. Полученные зольные остатки взвешивались и гомогенизировались до однородной порошкообразной массы. Для определения макроэлементного состава зольные остатки разбавлялись графитовым порошком в соотношении 1:100. При анализе примесей, в том числе тяжелых металлов, осуществлялось разбавление в соотношении 1:10 с учетом устранения матричных влияний основных компонентов. Выбор указанного соотношения обусловлен пределом обнаружения ряда регламентируемых тяжелых металлов.

Анализ проводился на атомно-эмиссионном спектрометре «Гранд» с многоканальным анализатором эмиссионных спектров (МАЭС) в комплексе с полихроматором «Роуланда» и генератором «Везувий-3» (РФ), оснащенном программой «Атом» [16–30].

Для оценки влияния матричных элементов при анализе примесей и микропримесей выполнялся предварительный скрининг исследуемых объектов на содержание основных элементов и анионов, входящих в состав зольных остатков.

Достоверность результатов для анализа волос подтверждена путем сравнения с методом ИСП-МС низкого разрешения (Agilent 7500cx).

Учет матричного влияния сульфата кальция при спектральном анализе волосяного субстрата осуществлялся путем корректирующих коэффициентов, выведенных и учтенных при аттестации методики. Модернизированный подход продемонстрировал превосходство над альтернативной методикой ИСП-МС.

Достоверность проведения оценки грибов проводилась по критериям равноточности и внутрилабораторной прецизионности с участием нескольких операторов. Для растительных объектов проверка правильности результатов выполнена путем сравнения содержания микроэлементов в стандартном образце листа березы. Матричное влияние устранилось путем введения в стандартные образцы компонентов, имитирующих состав реальных проб графитового коллектора микропримесей СОГ-37 [28]: для грибов – спиртовой раствор фосфата калия, для растений – спиртовой раствор карбоната калия в расчете 2 масс. % по калию, что согласуется с его содержанием в зольных остатках исследуемых проб и стандарта листа березы. Используемый метод анализа позволил повысить точность и воспроизводимость результатов экспериментов и подтвердить достоверность проведенных исследований.

Результаты и их обсуждение

В работе определено содержание основных элементов в объектах животного и растительного происхождения, отобранных на территории Парабельского района Томской области (табл. 1, 2).

Таблица 1

Скрининговый анализ минерального состава зольных остатков исследуемых объектов

Table 1

Screening analysis of the mineral composition of ash residues

Анализируемый объект	Элемент
Волосы	Ca > Mg > Zn > K > Na > P
Рыбы	Ca > Mg > Zn > Ba > P > Mn
Лекарственные растения	K > Ca > Mg > Na > Fe > Zn
Ягоды	K > Ca > Mg > P > Si > Mn
Грибы	K > Ca > Mg > Zn > Fe > Si

В табл. 2 представлены интервалы элементов, которые могут оказывать наибольшее влияние на определение примесей и микропримесей.

Основываясь на данных, представленных в табл. 1, 2, можно заключить, что в объектах животного происхождения преобладают Ca, Mg и Zn. В объектах растительного происхождения – K, Ca и Mg. Эти данные указывают на особую роль ионов калия в жизнедеятельности представителей флоры, в то время как в объектах животного происхождения решающую роль играют ионы кальция.

С помощью ИК-спектроскопии в режиме нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с использованием Фурье-спектрометра установлен анионный состав [29–33] зольных остатков исследуемых объектов (рис. 1–4).

Таблица 2
Концентрация основных элементов, входящих в состав зольных остатков исследуемых объектов (в масс. %)

Table 2

Concentration (wt. %) of the main elements included in the composition of ash residues

Анализируемые объекты	K	Ca	P
Грибы	15–20	3–5	0,5–1,0
Ягоды	8–10	2–4	1,0–2,0
Лекарственные растения	15–20	4–6	2–4
Волосы	0,5–1,0	20–30	0,1
Рыбы	1,0–2,0	12–15	0,6–0,8

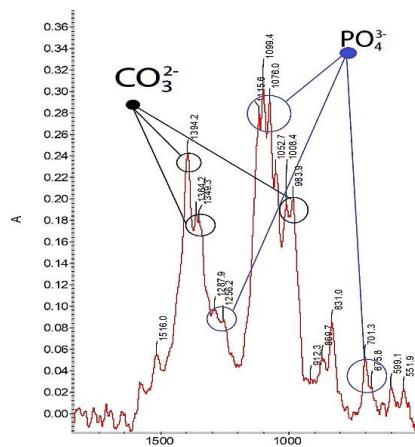


Рис. 1. ИК-спектр поглощения золы грибов
Fig. 1. IR absorption spectrum of milk fungus ash residuals

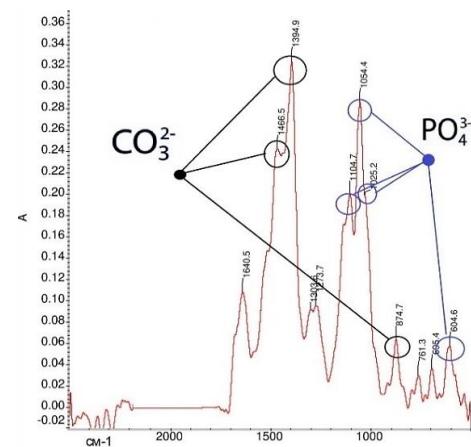
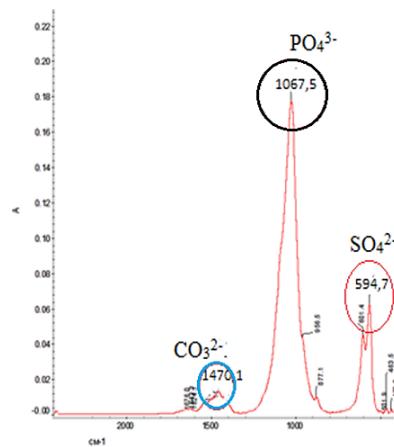


Рис. 2. ИК-спектр поглощения золы малины
Fig. 2. IR absorption spectrum of Rubus idaeus ash residuals



Вестник ТГАСУ. 2025. Т. 27. № 6

Рис. 3. ИК-спектр поглощения золы леща
Fig. 3. IR absorption spectrum of Abramis brama ash residuals

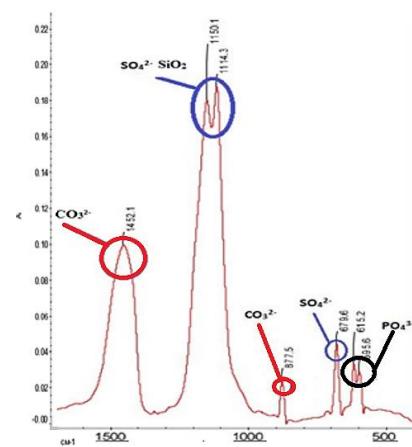


Рис. 4. ИК-спектр поглощения золы волос
Fig. 4. IR absorption spectrum of hair ash residual

С учетом катионного и анионного состава, полученного при проведении скринингового анализа, можно заключить, что зола грибов состоит главным образом из фосфатов калия, зола волос – из сульфатов кальция, зола растительного сырья – из карбонатов калия с примесью фосфатов, а зола чешуи рыб – из фосфатов кальция. Полученные результаты по катионному и анионному составу использованы для устранения матричных влияний преобладающих основных элементов при спектральном анализе.

В свете развивающейся методологии выявлена региональная специфика содержания элементов тяжелых металлов в волосах жителей Парабельского района в возрасте от 18 до 50 лет, свидетельствующая об элементном дисбалансе и негативном влиянии окружающей среды на здоровье людей (табл. 3).

Таблица 3
**Содержание макро- и микроэлементов
в волосах жителей Парабельского района ($P = 0,95$; $n = 20$)**
Table 3
**Content of macro- and microelements in hair
of Parabelsky urban zone residents ($P = 0.95$, $n = 20$)**

Элемент	Референтные значения	с. Парабель	
		Интерквартильный размах	Медиана
Ag	0,005–0,2	0,13–0,95	0,3
Al	1–40	69–163	101
Ba	0,2–1	0,7–1,7	1,24
B	0,1–3,5	0,08–0,24	0,06
Be	0,005–0,01	< 0,01	< 0,01
Bi	0,1–2	0,01–0,12	0,05
Ca	200–3000	740–1 870	1 050
Cd	0,05–0,25	0,041–0,14	0,11
Co	0,01–0,5	0,03–0,12	0,07
Cr	0,1–4	0,14–0,57	0,3
Cu	7,5–20	5,1–8,8	6,8
Fe	10–50	29–108	59
Mg	20–200	68–174	91
Mn	0,1–2	2,0–4,5	3,3
Mo	0,02–2	< 0,01	< 0,01
Ni	0,1–2	0,03–0,35	0,15
P	75–200	271–442	371
Pb	0,1–5	1,2–4,5	2,4
Sb	0,005–1	0,07–0,31	0,18
Si	10–2000	91–550	211
Sn	0,05–2,5	0,1–0,47	0,27
Sr	0,5–5	0,39–1,5	1,0
Ti	0,5–8	< 0,01	< 0,01
Zn	100–250	307–452	373

Установлено повышенное накопление Ba, Al, Ag, Fe, P, Mn, Zn и дефицит Mo по сравнению с референтными значениями, что может приводить к проблемам с желудочно-кишечным трактом, давлением и способствовать снижению иммунитета.

Результаты количественного определения содержания тяжелых металлов в грибах, ягодах и лекарственных растениях, представлены в табл. 4–6.

Таблица 4
Содержание тяжелых металлов в грибах исследуемого региона
Table 4
Content of heavy metals in mushrooms

Объект	Концентрация элементов (мкг/г)				
	Свинец	Кадмий	Мышьяк	Медь	Цинк
ПДК	0,5	0,1	0,5	10,0	20,0
Груздь (<i>Lactariusresimus</i>)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,51	6,9
Моховик (<i>Imleriabadia</i>)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	1,8	2,1
Подосиновик (<i>Leccinumaurantiacum</i>)	< 0,001	< 0,001	0,004	1,3	7,6
Лисички (<i>Cantharelluscibarius</i>)	< 0,001	0,29	0,021	2,1	19,4
Подберезовик (<i>Leccinumscabrum</i>)	< 0,001	< 0,001	0,03	0,34	18,9
Масленок (<i>Suillusluteus</i>)	< 0,001	0,61	0,04	0,18	17,9
Белый гриб (<i>Boletusedulis</i>)	< 0,001	< 0,001	0,101	7,7	16,5

Таблица 5
Содержание тяжелых металлов в ягодах исследуемого региона
Table 5
Content of heavy metals in berries

Объект	Концентрация элементов (мкг/г)				
	Свинец	Кадмий	Мышьяк	Медь	Цинк
ПДК	0,4	0,03	0,2	5,0	10,0
Малина (<i>Rubus idaeus</i>)	< 0,001	0,014	0,051	2,3	7,1
Брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)	< 0,001	0,021	0,008	3,1	9,8
Смородина черная (<i>Ribes nigrum</i>)	< 0,001	0,023	0,03	2,2	7,7
Смородина красная (<i>Ribes rubrum</i>)	< 0,001	0,018	0,07	1,9	8,3
Клюква (<i>Vaccinium oxycoccus</i>)	< 0,001	< 0,001	0,05	0,89	6,1
Жимолость (<i>Lonicera caerulea</i>)	< 0,001	< 0,001	0,06	0,57	7,6
Крыжовник (<i>Ribes uva-crispa</i>)	< 0,001	< 0,001	0,08	0,33	4,5

Анализ данных табл. 4, 6 отражает превышение норм содержания кадмия в некоторых видах грибов и лекарственных растениях. В ягодах (табл. 5) превышений не обнаружено. Вероятно, превышение норм по кадмию связано со сжиганием ископаемого топлива и высокой подвижностью кадмия в кислых почвах, преобладающих в районе. Повышенная кислотность способствует растворению соединений кадмия. Известно [34–37], что растения могут поглощать

кадмий через транспортные системы кальция, что приводит к его неконтролируемому накоплению. Также обнаружено некоторое превышение по мышьяку и цинку в чешуе рыб из водоемов исследуемого региона.

Таблица 6

**Содержание тяжелых металлов
в лекарственных растениях исследуемого региона**

Table 6

Content of heavy metals in medicinal plants

Объект	Концентрация элементов (мкг/г)				
	Свинец	Кадмий	Мышьяк	Медь	Цинк
ПДК	0,5	0,1	1,0	15,0	50,0
Лабазник вязолистный (Filipendula ulmaria)	0,12	0,016	0,31	1,3	17,1
Тысячелистник обыкновенный (Achillea millefolium)	0,16	0,21	0,40	1,2	9,6
Кипрей узколистный (иван-чай) (Chamaenerion angustifolium)	0,13	0,15	0,31	0,7	12,2

По результатам проведенного полного химического анализа были рассчитаны коэффициенты концентрирования тяжелых металлов и определена биохимическая активность исследуемых популяций (табл. 7).

Таблица 7

**Коэффициенты биохимической активности объектов
растительного происхождения Парабельского района Томской области**

Table 7

Coefficients of biochemical activity of plant objects in the Parabelsky urban zone

Грибы								
КБА	Клюква (Vaccinium oxycoccus)		Моховик (Imleriabadia)		Подберезовик (Leccinum- scabrum)		Подосиновик (Leccinumau- rantiacum)	
	14,1	8,1	7,3	8,0	9,1	12,3	7,1	
Ягоды								
КБА	Клюква (Vaccinium oxycoccus)	Смородина красная (Ribes rubrum)	Малина (Rubus idaeus)	Смородина черная (Ribes nigrum)	Брусника (Vaccinium vitisidaea)	Жимолость (Lonicera caerulea)	Крыжовник (Ribes uvacrispa)	
3,4	7,4	5,7	5,8	5,3	6,1	4,4		

Окончание табл. 7
End of table 7

Лекарственные растения			
	Кипрей узколистный (Chamaenerionangustifolium)	Лабазник вязолистный (Filipendulaulmaria)	Тысячелистник обыкновенный (Achilleamillefolium)
КБА	9,4	7,7	9,1

Коэффициенты концентрирования и биохимической активности рассчитывали по формулам: $K_c = \frac{m}{n}$ (m – содержание химического элемента в объекте исследования, %; n – содержание химического элемента в почве, %) и КБА = $\sum K_c$ соответственно.

Из анализа данных табл. 7 можно заключить, что грибы обладают наибольшей биохимической активностью, что обусловлено большой площадью поверхности мицелия, наличием хитина и меланина в клеточных стенках, обладающих высокой сорбционной способностью к ионам металлов, кроме того, большинство грибов являются гетеротрофами, которые питаются разлагающимся органическим веществом, извлекая питательные вещества и микроэлементы из почвы. Ягоды же, получая питательные вещества непосредственно из растения, зависят от его способности извлекать элементы из почвы.

Заключение

Таким образом, в результате проведенного исследования установлены причины нарушения принципов экологической архитектуры при освоении и застройке исследуемого района, а также факторы, ухудшающие качество комфортной среды обитания (КСО). Комплексный анализ маркеров экологического загрязнения окружающей среды позволяет сделать заключение о неблагоприятном экологическом состоянии района.

Выявлено превышение предельно допустимых концентраций ряда тяжелых металлов в растительных образцах, а также дисбаланс в накоплении химических элементов в биотканях животных. Для улучшения экологической обстановки и повышения качества среды обитания населения Парабельского района необходимо разработать комплекс мероприятий, направленных на снижение антропогенной нагрузки, устранение превышения предельно допустимых концентраций тяжелых металлов, таких, например, как кадмий, и локализацию источников загрязнения. Полученные результаты подтверждают высокую информативность и перспективность применения биоиндикационного метода с использованием представителей фауны и флоры как маркеров КСО при оценке экологического состояния территорий в рамках принципов экологической архитектуры и устойчивого градостроительного развития.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеенко А.В. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 11. С. 121–128.

2. *Отмахов В.И., Петрова Е.В., Пушкирева Т.Н., Островерхова Г.П.* Атомно-эмиссионная методика анализа грибов на содержание тяжелых металлов и использование ее для целей экомониторинга // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. С. 44–48. EDN: HPMTFL
3. *Бурова Л.Г.* Загадочный мир грибов // Человек и окружающая среда. Москва : Наука, 1991. 97 с.
4. *Мамалимова И.С.* Геоэкологическая характеристика и проект мониторинга на территории Казанского нефтегазоконденсатного месторождения (Томская область) : дипломный проект. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. 24 с.
5. *Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н.* Почвы Обь-Томского междуречья // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011. № 3 (15). С. 16–37. EDN: ODVJWP
6. *Hancock J.F.* Temperate Fruit Crop Breeding: Germplasm to Genomics. Springer Science& Business Media, 2008. 456 p. ISBN 978-90-481-7759-2.
7. *Alloway B.J.* Heavy Metals in Soils: Environmental Pollution and Health Effects // Blackie Academic& Professional, 1995. Р. 73–77.
8. *Дьякова Н.А.* Исследование элементного состава лекарственного растительного сырья Воронежской области // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2023. Т. 12. № 3. С. 195–201. DOI: 10.33380/2305-2066-2023-12-3-195-201. EDN: LPSYNV
9. *Макаров А.Б., Талалай А.Г., Гуман О.М., Хасанова Г.Г.* Техногенные месторождения и особенности их воздействия на природную окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 3. С. 120–129. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-120-129. EDN: UYAITQ
10. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с. EDN: UAJSQV
11. *Гилева Т.А., Зиновьев Е.А., Костицына Н.В.* Содержание тяжелых металлов в органах и тканях рыб, обитающих в разнотипных водоемах Пермского края // Аграрный вестник Урала. 2014. № 8 (126). С. 73–77. EDN: SWEGSL
12. *Тылик К.В.* Общая ихтиология. Калининград : ООО «Акснос», 2015. 394 с. ISBN: 978-5-91726-109-6. EDN: WNUISX
13. *Наркович Д.В., Барановская Н.В.* О нормативах содержания химических элементов в волосах детей // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде : материалы VII Международной научно-практической конференции. В 2 томах. Том 2. Семей : СГПИ, 2012. С. 209–215.
14. *Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риши М.А., Строчкова Л.С.* Микроэлементозы человека (этиология, классификация, органопатология). Москва : Медицина, 1991. 496 с.
15. *Buffoli B., et al.* The human hair: from anatomy to physiology // International Journal of Dermatology. 2014. V. 53. P. 331–341.
16. *Лабусов В.А., Гаранин В.Г., Зарубин И.А.* Новые спектральные комплексы на основе аналитических анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1–II. С. 15–20. EDN: XUXPEJ
17. *Отмахов В.И., Петрова Е.В.* Оптимизация условий проведения атомно-эмиссионного спектрального анализа порошковых проб сложного состава на графитовой основе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1–2. С. 82–85. EDN: OOEMYL
18. *Отмахов В.И.* Методологические особенности создания методик атомно-эмиссионного анализа различных объектов // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. № 3. С. 245–249. EDN: KHPZQB
19. *Otmakhov V., et al.* New method of spectral analysis of human hair // AIP Conference Proceedings. 2016. DOI: 10.1063/1.4964572. EDN: XFQBDB
20. *Отмахов В.И., Рабцевич Е.С., Горст Д.А., Петрова Е.В., Бабенков Д.Е.* Создание методики определения элементного состава клещей для оценки их восприимчивости к возбудителям клещевых инфекций // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2018. № 11. С. 23–31. DOI: 10.17223/24135542/11/2. EDN: UTKVFM
21. *Отмахов В.И., Рабцевич Е.С., Петрова Е.В., Шилова И.В., Шелег Е.С., Бабенков Д.Е.* Элементный анализ лекарственных растений Сибири методом дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров // Заводская ла-

- боратория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1-II. С. 60–66. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-60-66. EDN: YXLHFB
22. Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Павлова А.Н., Обухова А.В. Периодические зависимости распределения химических элементов в зольном остатке волос человека // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1-II. С. 73–77. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-73-76. EDN: YXLHFR
23. Бабенков Д.Е., Отмахов В.И., Петрова Е.В., Повесьма Ю.А., Салосина Ю.Е. Методология выбора алгоритмов оптимизации условий проведения дугового атомно-эмиссионного спектрального анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1-II. С. 77–81. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-77-81. EDN: YXLHFZ
24. Отмахов В.И. Методологические особенности создания методик атомно-эмиссионного анализа различных объектов // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. № 3. С. 245–249. EDN: KHPZQB
25. Отмахов В.И., Обухова А.В., Ондар С.А., Омельченко М.В., Рабцевич Е.С., Петрова Е.В. Оценка достоверности проведения химического анализа волос методом дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2018. № 12. С. 25–36. DOI: 10.17223/24135542/12/3. EDN: YTSKJN
26. Отмахов В.И., Петрова Е.В. Атомно-эмиссионный анализ биологических объектов с целью проведения экомониторинга районов Томской области и Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 1. С. 73–77. EDN: GZHSWS
27. Обухова А.В., Отмахов В.И., Шилова И.В., Саркисов Ю.С., Янюк А.Е., Петрова Е.В. Особенности накопления элементов в плодово-ягодных растениях, культивируемых в окрестностях г. Зеленогорска Красноярского края // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 289–298. DOI: 10.14258/jcprm.20230412482. EDN: ETYBXJ
28. Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Кускова И.С., Обухова А.В., Петрова Е.В. О некоторых закономерностях распределения химических элементов в живых организмах // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2020. № 17. С. 34–50. DOI: 10.17223/24135542/17/3. EDN: NMGHWO
29. *Otmaiov V.I., Kuskova I.S., Obukhova A.V., Petrova E.V., Sarkisov Y.S. Chemical codes identification based on periodic dependences of chemical element distribution in biological objects // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V.1611. № 1. 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1611/1/012038*
30. *Otmaiov V.I., Obukhova A.V., Petrova E.V., Sarkisov Y.S. Atomic Emission Spectrometer «Grand» for Studying the Features of Accumulation and Distribution of Chemical Elements in Objects of Animal Origin // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. V. 574. P. 1362–1371. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_145*
31. ГСО. Стандартные образцы состава графитового коллектора микропримесей. Комплект СОГ-37, УГГУ–УПИ. Екатеринбург, 2003. 12 с.
32. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. Москва : Мир, 1991. 536 с.
33. Коваленко В.И., Диденко Т.Л., Нестеров А.В. Идентификация веществ в смеси методом инфракрасной спектроскопии. Казань, 2006. 20 с.
34. Васильев А.В., Гриненко Е.В., Щукин А.О., Федулина Т.Г. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений. Санкт-Петербург : СПБГЛТА, 2007. 54 с.
35. Колесник И.В., Саполетова Н.А. Инфракрасная спектроскопия. Москва : Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2011. 88 с.
36. Егоров А.С. Инфракрасная Фурье-спектроскопия. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. 40 с.
37. Воронина Л.П., Поногайбо К.Э., Абрамов Е.Г., Кирьякова Н.А., Савостикова О.Н. К нормированию кадмия в почве по его воздействию на растения // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 11. С. 1154–1163. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-11-1154-1162. EDN: RRXPMX

REFERENCES

1. Alekseenko A.V. Heavy Metals the Environmental Pollution Factor. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; (11): 121–128. (In Russian)

2. *Otmakhov V.I., Petrova E.V., Pushkareva T.N., Ostroverkhova G.P.* Atomic Emission Technique for Heavy Metal Content Analysis in Mushrooms for Environmental Monitoring Purposes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2004; 307 (6): 44–48. (In Russian)
3. *Burova L.G.* The Mysterious World of Mushrooms. *Chelovek i okruzhayushchaya sreda*. Moscow: Nauka, 1991. 97 p. (In Russian)
4. *Mamalimova I.S.* Geoecological Characteristics and Monitoring the Territory of Kazan Oil and Gas Condensate Field (Tomsk Region). Graduation Work. Tomsk: TPU, 2016. 24 p. (In Russian)
5. *Dyukarev A.G., Pologova N.N.* Soils of the Ob-Tomsk Interfluve. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2011; 3 (15): 16–37. (In Russian)
6. *Hancock J.F.* Temperate Fruit Crop Breeding: Germplasm to Genomics. Springer Science & Business Media, 2008. 456 p. ISBN 978-90-481-7759-2.
7. *Alloway B.J.* Heavy Metals in Soils: Environmental Pollution and Health Effects. Blackie Academic & Professional, 1995. Pp. 73–77.
8. *Dyakova N.A.* Elemental Composition of Medicinal Plant Materials in the Voronezh Region. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*. 2023; 12 (3): 195–201. (In Russian)
9. *Makarov A.B., Talalay A.G., Guman O.M., Khasanova G.G.* Man-Made Deposits and their Impact on Natural Environment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2022; (3): 120–129. (In Russian)
10. *Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V.* Heavy Metals and Plants. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2014. 194 p. (In Russian)
11. *Gileva T.A., Zinoviev E.A., Kostitsyna N.V.* Content of Heavy Metals in Organs and Tissues of Fish from Different Water Bodies in the Perm Territory. *Agrarnyi vestnik Urala*. 2014; 8 (126): 73–77. (In Russian)
12. *Tyl'k K.V.* General Ichthyology. Kaliningrad: OOO "Aksnos", 2015. 394 p. (In Russian)
13. *Narkovich D.V., Baranovskaya N.V.* Standards of chemical elements content in children hair. In: *Proc. 7th Int. Sci. Conf. 'Heavy metals and radionuclides in the environment'*, in 2 vol. Vol. 2. Semei: SGPI, 2012. Pp. 209–215. (In Russian)
14. *Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S.* Human Microelementoses (Etiology, Classification, Organopathology). Moscow: Meditsina, 1991. 496 p. (In Russian)
15. *Buffoli B., et al.* The Human Hair: From Anatomy to Physiology. *International Journal of Dermatology*. 2014; 53: 331–341.
16. *Labusov V.A., Garanin V.G., Zarubin I.A.* New Spectral Complexes based on MAES Analyzers. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2017; 83 (1-II): 15–20. (In Russian)
17. *Otmakhov V.I., Petrova E.V.* Optimization of Conditions for Atomic Emission Spectral Analysis of Complex Graphite-Based Powders. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2012; 78 (1–2): 82–85. (In Russian)
18. *Otmakhov V.I.* Atomic Emission Analysis Methods Created for Various Objects. *Analitika i kontrol'*. 2005; 9 (3): 245–249. (In Russian)
19. *Otmakhov V., et al.* New Method of Spectral Analysis of Human Hair. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4964572> (accessed April 17, 2025). (In Russian)
20. *Otmakhov V.I., Rabtsevich E.S., Gorst D.A., Petrova E.V., Babenkov D.E.* Methodology for Tick Elemental Composition Detection to Assess their Susceptibility to Tick-Borne Pathogens. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*. 2018; (11): 23–31. (In Russian)
21. *Otmakhov V.I., Rabtsevich E.S., Petrova E.V., Shilova I.V., Sheleg E.S., Babenkov D.E.* Elemental Analysis of Medicinal Plants of Siberia using Arc Atomic Emission Spectrometry with Multichannel Analyzer of Emission Spectra. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019; 85 (1): 60–66. (In Russian)
22. *Otmakhov V.I., Sarkisov Yu.S., Pavlova A.N., Obukhova A.V.* Periodic Dependences of Chemical Element Distribution in Ash Residue of Human Hair. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019; 85 (1): 73–77. (In Russian)
23. *Babenkov D.E., Otmakhov V.I., Petrova E.V., Povesma Yu.A., Salosina Yu.E.* Methodology of Selecting Algorithms for Optimization of Conducting Arc Atomic Emission Spectral Analysis. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019; 85 (1): 77–81. (In Russian)
24. *Otmakhov V.I.* Methodological Peculiarities of the Creation of Atomic Emission Analysis Techniques for Various Objects. *Analytics and Control*. 2005; 9 (3): 245–249. (In Russian)

25. *Otmakhov V.I., Obukhova A.V., Ondar S.A., Omelchenko M.V., Rabtsevich E.S., Petrova E.V.* Reliability of Hair Chemical Analysis using Arc Atomic Emission Spectroscopy. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya.* 2018; (12): 25–36. (In Russian)
26. *Otmakhov V.I., Petrova E.V.* Atomic Emission Analysis of Biological Objects for Eco-Monitoring Tomsk Region Urban Zones and Altai Mountains. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.* 2004; 307 (1): 73–77. (In Russian)
27. *Obukhova A.V., Otmakhov V.I., Shilova I.V., Sarkisov Yu.S., Yanyuk A.E., Petrova E.V.* Accumulation of Elements in Fruit and Berry Plants Cultivated near Zelenogorsk, Krasnoyarsk Territory. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* 2023; (4): 289–298. (In Russian)
28. *Otmakhov V.I., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Kuskova I.S., Obukhova A.V., Petrova E.V.* Distribution Patterns of Chemical Elements in Living Bodies. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya.* 2020; (17): 34–50. DOI: 10.17223/24135542/17/3 (In Russian)
29. *Otmakhov V.I., Kuskova I.S., Obukhova A.V., Petrova E.V., Sarkisov Y.S.* Chemical codes identification based on periodic dependences of chemical element distribution in biological objects. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020; 1611 (1): 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1611/1/012038
30. *Otmakhov V.I., Obukhova A.V., Petrova E.V., Sarkisov Y.S.* Atomic Emission Spectrometer “Grand” for Studying the Accumulation and Distribution of Chemical Elements in Objects of Animal Origin. *Lecture Notes in Networks and Systems.* 2023; 574: 1362–1371. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_145
31. Standard Samples of Structure of a Graphite Collector of Microimpurity. Ekaterinburg, 2003. 12 p. (In Russian)
32. *Nakamoto K.* Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Moscow: Mir, 1991. 536 p. (Russian translation)
33. *Kovalenko V.I., Didenko T.L., Nesterov A.V.* Infra-Red Spectroscopy of Substances in a Mixture: Guidelines. Kazan, 2006. 20 p. (In Russian)
34. *Vasiliev A.V., Grinenko E.V., Shchukin A.O., Fedulina T.G.* Infrared Spectroscopy of Organic and Natural Compounds. Saint-Petersburg, 2007. 54 p. (In Russian)
35. *Kolesnik I.V., Sapoletova N.A.* Infrared Spectroscopy. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2011. 88 p. (In Russian)
36. *Egorov A.S.* Infrared Fourier Spectroscopy. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2012. 40 p. (In Russian)
37. *Voronina L.P., Ponogaibo K.E., Abramov E.G., Kiryakova N.A., Savostikova O.N.* Standardization of Cadmium in Soil According to its Impact on Plants. *Gigiena i sanitariya.* 2023; 102 (11): 1154–1163. (In Russian)

Сведения об авторах

Отмаков Владимир Ильич, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, otmahov2004@mail.ru

Саркисов Юрий Сергеевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sarkisov@tsuab.ru

Зубкова Ольга Александровна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, zubkova0506@mail.ru

Authors Details

Vladimir I. Otmakhov, DSc, Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, otmahov2004@mail.ru

Yuriy S. Sarkisov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sarkisov@tsuab.ru

Olga A. Zubkova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, zubkova0506@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 15.09.2025
Одобрена после рецензирования 02.10.2025
Принята к публикации 03.10.2025

Submitted for publication 15.09.2025
Approved after review 02.10.2025
Accepted for publication 03.10.2025