

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры строительной механики ТГАСУ, г. Томск; [lls@tsuab.ru](mailto:lls@tsuab.ru)  
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ректор МГСУ, г. Москва; [pavel.akimov@gmail.com](mailto:pavel.akimov@gmail.com)  
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО, г. Москва; [amb@stadyo.ru](mailto:amb@stadyo.ru)  
Беккер А.Т., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, научный руководитель политехнического института ДВФУ, г. Владивосток; [bekker.at@dvfu.ru](mailto:bekker.at@dvfu.ru)  
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России, г. Москва; [niitag@yandex.ru](mailto:niitag@yandex.ru)  
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, советник РААСН, ректор ТГАСУ, г. Томск; [rector@tsuab.ru](mailto:rector@tsuab.ru)  
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ, г. Томск; [vgg-tomsk@mail.ru](mailto:vgg-tomsk@mail.ru)  
Волокитин О.Г., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, проректор по научной работе ТГАСУ, г. Томск; [study@tsuab.ru](mailto:study@tsuab.ru)  
Галютин З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; [z.galyutdinov@tsuab.ru](mailto:z.galyutdinov@tsuab.ru)  
Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, профессор кафедры технологии строительного производства ТГАСУ, г. Томск; [tsp\\_tgasu@mail.ru](mailto:tsp_tgasu@mail.ru)  
Детярев В.В., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru)  
Есаулов Г.В., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, проректор по научной работе МАРХИ, г. Москва; [gvesaulov@raasn.ru](mailto:gvesaulov@raasn.ru)  
Ефименко В.Н., докт. техн. наук, профессор кафедры автомобильных дорог ТГАСУ, г. Томск; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru)  
Ефименко С.В., докт. техн. наук, зав. кафедрой автомобильных дорог ТГАСУ, г. Томск; [svefimenko@tsuab.ru](mailto:svefimenko@tsuab.ru)  
Зайченко Н.М., докт. техн. наук, профессор, ректор ДонНАСА, г. Макеевка; [mailbox@donnasa.ru](mailto:mailbox@donnasa.ru)  
Ильичев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН, г. Москва; [ilyichev@raasn.ru](mailto:ilyichev@raasn.ru)  
Каприлов С.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. лабораторией НИИЖБ, г. Москва; [kaprielov@masterbeton-mb.ru](mailto:kaprielov@masterbeton-mb.ru)  
Копаница Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; [kopantsa@mail.ru](mailto:kopantsa@mail.ru)  
Кудряков А.И., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; [kudyakov@tsuab.ru](mailto:kudyakov@tsuab.ru)  
Кумпьяк О.Г., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; [kumpyak@yandex.ru](mailto:kumpyak@yandex.ru)  
Лютос В.А., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; [valotov@tpu.ru](mailto:valotov@tpu.ru)  
Люсия Тсантисис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; [lucia.tsanilis@polito.it](mailto:lucia.tsanilis@polito.it)  
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург; [morozov@spbgasu.ru](mailto:morozov@spbgasu.ru)  
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ, советник РААСН, г. Томск; [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)  
Орзобеков М.О., докт. техн. наук, профессор ОмГУ, г. Омск, Кыргызская Республика; [oshsu@mail.ru](mailto:oshsu@mail.ru)  
Поляков Е.Н., докт. искусствоведения, канд. архитектуры, профессор кафедры теории и истории архитектуры ТГАСУ, член Союза архитекторов России, г. Томск; [polyakov-en@yua.ru](mailto:polyakov-en@yua.ru)  
Ситникова Е.В., канд. архитектуры, доцент кафедры реставрации и реконструкции архитектурного наследия ТГАСУ, г. Томск; [elensi@vtomsk.ru](mailto:elensi@vtomsk.ru)  
Сколубович Ю.Л., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ректор НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; [sjl1964@mail.ru](mailto:sjl1964@mail.ru)  
Телтаев Б.Б., докт. техн. наук, профессор, академик Национальной инженерной академии РК и Международной академии транспорта, г. Алматы, Республика Казахстан; [bagdatbt@yahoo.com](mailto:bagdatbt@yahoo.com)  
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, г. Москва; [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)  
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ, г. Томск; [nac.tsuab@yandex.ru](mailto:nac.tsuab@yandex.ru)  
Шубенков М.В., докт. архитектуры, профессор, вице-президент РААСН, зав. кафедрой градостроительства МАРХИ, г. Москва; [shubenkov@gmail.com](mailto:shubenkov@gmail.com)  
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН, г. Москва; [niisf@niisf.ru](mailto:niisf@niisf.ru)  
Чупин В.Р., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой городского строительства и хозяйства ИНИТУ, г. Ижевск; [chupinvr@existu.edu](mailto:chupinvr@existu.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](http://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://www.iprbookshop.ru), а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tgasu.ru>

Научное издание

ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА № 5 – 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. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.  
Технический редактор Н.В. Удлер.

Подписано в печать 22.10.2025. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.

Дата выхода: 28.10.2025.

Уч.-изд. л. 21,44. Усл. печ. л. 25,46. Тираж 200 экз. Заказ № 51.

Цена: свободная.

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

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

16+

© Томский государственный  
архитектурно-строительный  
университет, 2025

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK  
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO  
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

**JOURNAL**  
**OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

Volume 27

№ 5 2025  
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

[illegible]

## EDITORIAL STAFF

Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Structural Mechanics Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [lls@tsuab.ru](mailto:lls@tsuab.ru)  
Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS, Rector, MGSU, Moscow, Russia; [pavel.akimov@gmail.com](mailto:pavel.akimov@gmail.com)  
Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Director General Research Center StaDiO, Moscow, Russia; [amb@stadyo.ru](mailto:amb@stadyo.ru)  
Bekker A.T., DSc, Professor, RAACS Academician, Academic Adviser, Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; [becker.at@dvfu.ru](mailto:becker.at@dvfu.ru)  
Bondarenko I.A., DSc, Professor, RAACS Academician, Director Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, Branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia; [niitag@yandex.ru](mailto:niitag@yandex.ru)  
Chupin V.R., DSc, Professor, Head of Urban Planning and Economy Dept., National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia; [chupinvr@ex.istu.edu](mailto:chupinvr@ex.istu.edu)  
Degtyarev V.V., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; [ngasu\\_gts@mail.ru](mailto:ngasu_gts@mail.ru)  
Efimenko V.N., DSc, Professor, Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [svefimenko\\_80@mail.ru](mailto:svefimenko_80@mail.ru)  
Efimenko S.V., DSc, Head of Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [svefimenko@tsuab.ru](mailto:svefimenko@tsuab.ru)  
Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia; [esaulovgv@raasn.ru](mailto:esaulovgv@raasn.ru)  
Galyautdinov Z.R., DSc, A/Professor, Head of Reinforced Concrete Construction Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [z.galyautdinov@tsuab.ru](mailto:z.galyautdinov@tsuab.ru)  
Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [tsp\\_gasu@mail.ru](mailto:tsp_gasu@mail.ru)  
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow, Russia; [ilyichev@raasn.ru](mailto:ilyichev@raasn.ru)  
Kapielov S.S., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Laboratory at Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia; [kapielov@masterbeton-mb.ru](mailto:kapielov@masterbeton-mb.ru)  
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies, TSUAB, Tomsk, Russia; [kopanitsa@mail.ru](mailto:kopanitsa@mail.ru)  
Kudryakov A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [kudryakov@tsuab.ru](mailto:kudryakov@tsuab.ru)  
Kumpyak O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [kumpyak@yandex.ru](mailto:kumpyak@yandex.ru)  
Lotov V.A., DSc, Professor, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [valotov@tpu.ru](mailto:valotov@tpu.ru)  
Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE, Saint-Petersburg, Russia; [morozov@spbgasu.ru](mailto:morozov@spbgasu.ru)  
Orozbekov M.O., DSc, Professor, Rector, Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic; [oshsu@mail.ru](mailto:oshsu@mail.ru)  
Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)  
Polyakov E.N., DArts, Professor, Member of the Union of Architects of Russia; Theory and History of Architecture Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [polyakov-en@ya.ru](mailto: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](mailto:sjl1964@mail.ru)  
Sitnikova E.V., DArts, A/Professor, Restoration and Renovation of Architectural Heritage Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [elensi@vtomske.ru](mailto:elensi@vtomske.ru)  
Shubenkov M.V., DArts, Professor, Head of Urban Planning Dept., Moscow Architectural Institute (State Academy), RAACS Vice President, Moscow, Russia; [shubenkov@gmail.com](mailto:shubenkov@gmail.com)  
Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS, Moscow, Russia; [niisf@niisf.ru](mailto:niisf@niisf.ru)  
Teltaev B.B., DSc, Professor, Academician, National Academy of Engineering of Kazakhstan and International Academy of Transport, Almaty, Kazakhstan; [bagdatbt@yahoo.com](mailto:bagdatbt@yahoo.com)  
Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician, Moscow, Russia; [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)  
Tsantilis L., A/Professor, Environment, Land and Infrastructure Engineering Dept., Polytechnic University of Turin, Turin, Italy; [lucia.tsantilis@polito.it](mailto:lucia.tsantilis@polito.it)  
Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [nac.tsuab@yandex.ru](mailto:nac.tsuab@yandex.ru)  
Vlasov V.A., DSc, Professor, RAACS Adviser, Rector, TSUAB, Tomsk, Russia; [rector@tsuab.ru](mailto:rector@tsuab.ru)  
Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; [vgg-tomsk@mail.ru](mailto:vgg-tomsk@mail.ru)  
Volokitin O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Vice-Rector for Research, TSUAB, Tomsk, Russia; [study@tsuab.ru](mailto:study@tsuab.ru)  
Zaichenko N.M., DSc, Professor, Rector, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Russia; [mailbox@donnasa.ru](mailto: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](http://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](http://www.iprbookshop.ru); <https://vestnik.tsuab.ru>

Scientific Edition  
VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA  
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 5 – 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. Udler.  
Passed for printing: 22.10.2025. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman. Issue date: 28.10.2025.  
Published sheets: 21,44. Conventional printed sheets: 25,46. Print run: 200 copies. Price: free.  
Order N 51.

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



© Tomsk State University  
of Architecture and Building, 2025



## СОДЕРЖАНИЕ

### АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

|                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Беляева З.В., Когтева Д.В.</b> Влияние ветровых нагрузок на развитие бионических форм зданий .....                                                                                      | 9   |
| <b>Духанина Е.С.</b> Архитектурно-планировочные принципы организации молодежных центров .....                                                                                              | 21  |
| <b>Кочешкова Е.И., Дубынин Н.В., Попов А.В., Корнев В.И., Ремарчук С.М., Глушенкова О.А.</b> Анализ и прогноз нормативного регулирования в архитектурном проектировании зданий вузов ..... | 37  |
| <b>Шевченко К.Д.</b> Формирование культурного центра для Южного федерального университета .....                                                                                            | 50  |
| <b>Поляков Е.Н., Полякова О.П.</b> «Брутальные» постройки Ле Корбюзье в Ахмадабаде (Индия, 1951–1957 годы) .....                                                                           | 64  |
| <b>Киселева О.В.</b> Факторы, влияющие на архитектурную типологию реабилитационных центров для спортсменов .....                                                                           | 88  |
| <b>Смолина О.О., Николаева А.В.</b> Генезис и развитие городской среды в исторической перспективе в Омске и Новокузнецке .....                                                             | 101 |
| <b>Кутуков А., Романова Л.С., Колокольцева Е.Н.</b> Конструкции деревянных лестниц в исторической застройке Томска конца XIX – начала XX века .....                                        | 116 |
| <b>Алескеров У.Е.</b> Симбиотическая архитектура: как города выживают сами по себе .....                                                                                                   | 128 |

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Кумпьяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р.</b> Условно упругие железобетонные балки с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении ..... | 145 |
| <b>Каширипур М.М., Николюк В.А.</b> К вопросу использования искусственного интеллекта в строительной индустрии .....                                                           | 160 |
| <b>Подшивалов И.И.</b> Моделирование напряженно-деформированного состояния металлических конструкций трамплина летающих лыжников в условиях реконструкции .....                | 174 |

### ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Белоус А.Н., Оверченко М.В., Бегич Я.Э., Белоус О.Е., Еникеев А.И.</b> Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов при условии квазистационарного теплового режима ..... | 185 |
| <b>Ивашкин В.С., Бурков А.И.</b> Применение теплонасосной установки в городе Перми .....                                                                                                     | 200 |

## ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Колмогоров С.Г., Клемяцкионк П.Л., Колмогорова С.С.</b> К вопросу о природной уплотненности глинистых грунтов..... | 211 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Волокитин Г.Г., Гольдин В.Д., Черемных В.А., Цветков Н.А.</b> Свойства поверхности строительных материалов из древесины сосны, обработанной низкотемпературной плазмой.....                                          | 220 |
| <b>Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К.</b> Исследование влияния добавок, снижающих содержание водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) в портландцементе для хризотилцементных изделий ..... | 234 |
| <b>Винокуров Е.О., Клопотов А.А., Абзаев Ю.А.</b> Механические свойства метаматериалов и конструкций на основе сплавов с эффектом памяти формы .....                                                                    | 247 |

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

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Щербаков В.В., Акимов С.С., Ковалева О.В.</b> Особенности определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог профилометрами и универсальным дорожным курвиметром «Ровность» ..... | 256 |
| <b>Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д.</b> Асфальтогенез в битумоминеральных композициях как показатель их старения.....                                                                            | 268 |
| <b>Кириллова Д.Ю., Ермошин Н.А.</b> К вопросу обеспечения надёжного проектирования автомобильных дорог с учётом требуемой работоспособности .....                                              | 279 |

## C O N T E N T S

### ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Belyaeva Z.V., Kogteva D.V.</b> Wind Load Impact on Bionic Architecture Development.....                                                                                                                      | 9   |
| <b>Dukhanina E.S.</b> Architectural and Planning Principles of Youth Centres .....                                                                                                                               | 21  |
| <b>Kocheshkova E.I., Dubynin N.V., Popov A.V., Korenev V.I., Remarchuk S.M., Glushenkova O.A.</b> Analysis and Forecast of Regulatory Control for Architectural Design and Creation of Modern Universities ..... | 37  |
| <b>Shevchenko K.D.</b> Cultural Center for Southern Federal University.....                                                                                                                                      | 50  |
| <b>Polyakov E.N., Polyakova O.P.</b> Le Corbusier's Brutalist Buildings in Ahmadabad (India, 1951–1957) .....                                                                                                    | 64  |
| <b>Kiseleva O.V.</b> Factors Influencing the Architectural Typology of Rehabilitation Centers for Athletes .....                                                                                                 | 88  |
| <b>Smolina O.O., Nikolaeva A.V.</b> Complex Urban Genesis and Development through History of Omsk and Novokuznetsk .....                                                                                         | 101 |
| <b>Kutukov A., Romanova L.S., Kolokol'tseva E.N.</b> Design of Wooden Staircases in Historical Houses of Tomsk in the 19–20th Centuries .....                                                                    | 116 |
| <b>Alasgarov U.E.</b> Symbiotic Architecture: How Cities Survive on Their Own.....                                                                                                                               | 128 |

### BUILDING AND CONSTRUCTION

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R.</b> Conditionally Flexible Steel Concrete Beams with Thrust on Yielding Supports under Dynamic Load ..... | 145 |
| <b>Kashiripoor M.M., Nikolyuk V.A.</b> Towards Artificial Intelligence in Construction Industry .....                                                           | 160 |
| <b>Podshivalov I.I.</b> Finite Element Modeling of Stress-Strain State of Ski-Jump Metal Structures under Reconstruction .....                                  | 174 |

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

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Belous A.N., Overchenko M.V., Begich Ya.E., Belous O.E., Enikeev A.I.</b> Thermal Properties of Heat Insulating Materials under Quasi-Stationary Thermal Conditions..... | 185 |
| <b>Ivashkin V.S., Burkov A.I.</b> Heat Pump System Application in the City of Perm .....                                                                                    | 200 |

## BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Kolmogorov S.G., Klemyatsionok P.L., Kolmogorova S.S.</b> On Natural<br>Compaction of Clay Soils ..... | 211 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Volokitin G.G., Goldin V.D., Cheremnykh V.A., Tsvetkov N.A.</b> Surface Properties<br>of Building Materials made of Pine Wood Treated with Low-Temperature Plasma .....                                          | 220 |
| <b>Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K.</b> Effect<br>of Additives Reducing Water-Soluble Chromium ( $\text{Cr}^{6+}$ ) Content in Portland Cement<br>for Chrysotile Cement Products ..... | 234 |
| <b>Vinokurov E.O., Klopotov A.A., Abzaev Yu.A.</b> Mechanical Properties<br>of Metamaterials and Structures Based on Shape Memory Alloys .....                                                                      | 247 |

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

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Shcherbakov V.V., Akimov S.S., Kovaleva O.V</b> Longitudinal Flatness of Road<br>Pavements Measured with Profilometer and Universal Curvimeter "Rovnost" ..... | 256 |
| <b>Lukashevich V.N., Lukashevich O.D.</b> Asphaltene Genesis in Bitumen-Mineral<br>Compositions as Ageing Indicator .....                                         | 268 |
| <b>Kirillova D.Yu., Ermoshin N.A.</b> Towards Reliable Design of Road Pavements<br>with Required Efficiency .....                                                 | 279 |

# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 9–20.

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 (5): 9–20.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-9-20

EDN: AGZNCU

### ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА РАЗВИТИЕ БИОНИЧЕСКИХ ФОРМ ЗДАНИЙ

**Зоя Владимировна Беляева, Дарья Викторовна Когтева**

*Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

**Аннотация.** Актуальность исследования бионических форм обоснована возрастающим интересом к формированию гармоничного, природоориентированного подхода к проектированию зданий.

**Целью** настоящей статьи является комплексный обзор существующих исследований и методик, относящихся к проектированию бионических форм, их реализации и оценке их благотворного влияния на ветровые воздействия. Рассматриваются общие концепции реализации «естественных правил» и адаптации форм к функциям строящегося объекта с точки зрения минимизации влияния негативных факторов, в том числе ветровых нагрузок, с использованием в качестве инструмента математических моделей.

**Задачи** исследования: анализ бионических систем как моделей-прототипов для внедрения в проектирование зданий; изучение современных воплощений бионических тенденций.

**Результаты.** Дается комплексное определение бионики в архитектуре и дизайне, очерчивается траектория исследования сложных строительных форм, приводятся наглядные примеры реализации бионических архитектурных решений.

**Выводы.** Исследования в области бионических форм способствуют развитию знаний о создании комфортной среды и генерации инновационных решений для дизайна новых объектов. Значимость полученных результатов заключается в их роли в формировании более комплексного восприятия дизайна, вызывая широкий интерес и стимулируя развитие инновационных знаний.

**Ключевые слова:** ветровая нагрузка, бионическая архитектура, сложные формы зданий

**Для цитирования:** Беляева З.В., Когтева Д.В. Влияние ветровых нагрузок на развитие бионических форм зданий // Вестник Томского государственного архи-

тектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 9–20. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-9-20. EDN: AGZNCU

## ORIGINAL ARTICLE

### WIND LOAD IMPACT ON BIONIC ARCHITECTURE DEVELOPMENT

**Zoya V. Belyaeva, Darya V. Kogteva**

*Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia*

**Abstract.** The pertinence of the study of bionic architecture is substantiated by escalating interest in establishing a harmonious, nature-oriented approach to the building design.

**Purpose:** The aim of the work is to conduct a comprehensive review of extent research and methodologies pertaining to bionic shapes, their implementation, and evaluation of their beneficial impact on wind effects. The article discusses general concepts of implementing "natural rules" and adapting shapes to the building functions to minimize the impact of negative factors, including wind loads, using mathematical models.

**Methodology:** The analysis of bionic systems as prototypes for the design implementation of buildings; study of modern embodiments of bionic trends.

**Research findings:** A comprehensive definition of bionics in architecture and design, delineates the trajectory of complex building shapes and presents examples of implementation of bionic architecture.

**Value:** Research into bionic shapes facilitates the development of knowledge concerning the creation of a comfortable environment and generation of innovative solutions for new design. The obtained results provide more comprehensive perception of design, evoking widespread interest and driving innovative knowledge.

**Keywords:** wind load, bionic architecture, complex building shape, surface

**For citation:** Belyaeva Z.V., Kogteva D.V. Wind Load Impact on Bionic Architecture Development. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 9–20. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-9-20. EDN: AGZNCU

### Введение

Для любой развивающейся инженерной компании важным фактором повышения конкурентоспособности считается эффективное, быстрое проектирование зданий. Архитектурные тенденции усложнения форм диктуют свои правила, общество стремительно идет к повышению комфорта, удобства пространства зданий.

Часто негативное влияние ветровой нагрузки на здания сложной формы или конструкции фасада можно избежать путем ориентации зданий по локальной розе ветров, анализа изменения показателей ветра во времени, применяя данные с ближайших метеостанций, учитывая влияние близрасположенных зданий на общий ветровой поток.

Важной особенностью выступает тенденция к развитию направления бионического проектирования с точки зрения учета ветровых нагрузок. Этот вектор отражает функциональные характеристики различных биологических процессов и структур. Данные характеристики при использовании архитектур-

ной бионики переносят в современную, динамически развивающуюся отрасль и внедряют инновационные правила для проектирования будущего [14].

Целью работы является обзор существующих исследований и подходов к проектированию бионических форм, их применению и оценка положительного влияния характеристик бионической формы на ветровые воздействия.

Задачи исследования:

1. Охарактеризовать направление бионики в архитектуре и проектировании.
2. Проанализировать положительное влияние сложных форм зданий и искусственных шероховатостей поверхностей фасадов в виде создания бионических решеток на распределение ветровых потоков.
3. Обобщить существующий опыт проектирования бионических форм.

### **Материалы и методы**

В основу исследования был заложен комплексный подход, включающий три ключевых этапа. Первоначально был проведен анализ методологических основ направления, а также обобщены различные аспекты применения бионики в архитектуре и проектировании. На следующем этапе был синтезирован теоретический материал, позволивший сформулировать понимание влияния усложнения архитектурных форм на ветровые нагрузки, и проведена конкретизация проблемы распределения ветровых потоков на здания простых геометрических форм. Завершающей стадией работы стал анализ современных предпосылок, определяющий дальнейшее развитие данного научного направления.

### **Актуальность исследования**

Изучение природных бионических форм с последующим внедрением в проектирование – актуальное направление в области архитектурного проектирования, что подтверждается наличием современных исследований ученых.

Природные формы могут быть использованы в архитектуре, например, путем их описания математическими моделями, отображающими процессы формирования природных форм; анализа структур, основанных на биологических принципах; оптимизации условий расположения и выбора материалов. На протяжении миллиардов лет природа эффективно решала проблемы, актуальные для настоящей эпохи. Животные, растительность и одноклеточные организмы демонстрируют высокую степень изобретательности в своей способности адаптироваться к окружающей среде, тем самым предоставляя модель эффективного взаимодействия с природой.

### **Определение и исторические предпосылки**

Бионика – это область науки и дизайна, вдохновляющаяся принципами, структурами и процессами, наблюдаемыми в природе. В современном проектировании зданий бионика становится все более популярной благодаря своей способности обеспечивать устойчивость, энергоэффективность и эстетическую привлекательность.

В сфере научных исследований различные дисциплины черпали идеи из природы, признавая ее роль как источника знаний и понимания. Приобретение знаний посредством всестороннего наблюдения за разнообразными образцами

и их воспроизведения сыграло важную роль в многочисленных научных достижениях. Эти реконструкции обладают потенциалом для предоставления рациональных объяснений рассматриваемых природных явлений. Стремление к глубокому пониманию природы, характеризующееся намерением воспроизвести ее образцы, обладает потенциалом для превращения этого намерения в осязаемую реальность.

### **Анализ влияния форм на ветровые нагрузки**

Немаловажно, что отдельно стоящие высотные здания сильно изменяют влияние воздействия воздушных потоков на придомовые территории, что может вызвать, в свою очередь, большое количество негативных явлений и их последствий. Могут появляться зоны на уровне пешеходных переходов, на верхних этажах здания, в которых создаются повышенные скорости ветра, избыточные давления, колебания низкой частоты и многое другое [1].

Для того чтобы свести негативное воздействие ветра к минимуму, появляются здания с овальными, с округлыми формами, волнообразные, со скругленными углами. Простейшим методом борьбы со срывом потоков с острых граней поперечного сечения конструкции является скругление углов. Вторым методом служит создание так называемых закрылок. Закрылки – элементы с воздушным пространством, представляющие тонкостенные пластинчатые конструкции, которые обтекают острые или скругленные формы зданий, позволяющие выпрямить, сгладить воздушный поток по граням конструкции. С помощью такого инструмента можно сохранить ламинарное движение потока. Прекрасно воспринимают ветровые воздействия конусные и иглообразные формы зданий, а также здания пирамидальной формы, жесткость которых увеличивается на 10–50 %. Также происходит существенное снижение ветровых воздействий на здания повышенной этажности при увеличении их ветровой проницаемости [6].

### **Преимущества использования бионических форм**

Краткий исторический обзор архитектуры выявляет тесную связь между живой и неживой природой и проектированием. Эта связь побудила специалистов отдавать приоритет устойчивости в своих проектах, что привело к различным проявлениям на протяжении столетий. К ним относятся формальная имитация живых организмов и включение природных элементов в архитектурный дизайн, например, архитектура, учитывающая климат. Это сосуществование проявляется различными способами, включая изменения текстуры, формы и геометрии организмов. Перечислим основные преимущества использования бионических форм:

- снижение потребления энергии ресурсов;
- устойчивость к изменениям климата;
- экономическая эффективность в долгосрочной перспективе;
- повышение качества жизни благодаря комфорту и эстетике зданий.

Бионика становится важной частью архитектуры, позволяя совмещать технологические достижения с мудростью природы.

Целью бионической архитектуры является достижение устойчивой архитектурной парадигмы, которая находится в гармонии с природой. Центральный



принцип бионики – подражание природным образцам и механизмам с использованием природы как основы для проверенных решений.

Основа бионического перевода коренится в принципе подобия. Компоненты природы или технологии связаны друг с другом на основе их общих характеристик. Концепция подобия в бионической архитектуре подразумевает установление связей и эквивалентностей между двумя сущностями с точки зрения их функциональности, поведения, формы и структуры. Этот подход включает преднамеренное подражание природным явлениям и механизмам для информирования о дизайне устойчивых и гармоничных архитектурных решений [15].

### **Роль бионических форм в устойчивости зданий**

Живые системы, сумевшие сохраниться в природе, могут служить концепцией оптимизации формы зданий и других технических решений.

Рассматривая форму фасада здания в качестве примера внедрения бионики, можно оптимизировать форму с точки зрения использования солнечной энергии и обтекания ветра, а также других факторов, тем самым создавая сложную «саморегулирующуюся» систему. Данная система сможет соответствовать всем тенденциям современного проектирования [18].

Изучая биологические структуры растений, можно отследить большое разнообразие форм, что связано с эволюционированием и приспособлением к факторам окружающей среды в данных условиях существования. Перемещая фокус на внедрение параметров стеблей в концепции проектирования, можно подчеркнуть высокую устойчивость, надежность, способность воспринимать ветровые нагрузки.

Таким образом, при изучении взаимодействия окружающей среды и природной структуры мы приходим к выводу о возможности внедрения особенностей строения природных систем и создания новых урбанистических структур [3].

Свойственные природе процессы, характеризующиеся присущей ей сложностью и непредсказуемостью, служат ценным источником вдохновения для разработки сложных концепций. Представление о том, что вдохновение черпается из экзистенциальных процессов, присущих природным явлениям, приводящих к формированию наблюдаемых сущностей, является убедительной альтернативой традиционным формальным и функциональным методологиям моделирования. Можно утверждать, что этот вид вдохновения и восприятия от природы является наиболее ценным типом вдохновения [16, 17]. Всестороннее исследование данных явлений необходимо для понимания лежащих в их основе механизмов. Все живые существа в природе имеют эволюционный процесс и со временем меняются в зависимости от своих потребностей. В этом подходе была сделана попытка представить самый фундаментальный принцип жизни: эволюцию. Конечным результатом этого начинания станет проявление отзывчивой архитектуры, которая демонстрирует динамическое взаимодействие с окружающей средой [11, 12].

### **Результаты и обсуждение**

Развитие живых организмов определяется различными факторами, включая инсоляцию, однако биологические структуры формируются как результат

воздействующих нагрузок. В этом контексте особое значение имеют аэродинамические и структурные анализы. В сфере архитектурного проектирования форма является важнейшим критерием. В контексте бионической архитектуры простое воспроизведение природных форм в архитектурном дизайне имеет ограниченное значение. Важными же вопросами считаются взаимосвязь между формой, функцией, структурой и материалами, а также взаимодействие с окружающей средой [7, 8]. Эффективность природных элементов, таких как функция, форма и структура, зависит от их гармоничной интеграции и адаптивности к окружающей среде. При отсутствии этой взаимосвязанности потенциал каждого элемента функционировать независимо уменьшается [9, 10].

Архитекторы используют два основных метода в применении и имитации природных форм. Первый метод подразумевает прямую имитацию природных форм, при этом здания служат лишь представлением окружающей природной среды. Во втором методе дизайнеры вдохновляются процессами формирования природных форм для создания новых проектов. Междисциплинарные исследования, проводимые разнообразными командами специалистов, становятся все более важными для детального анализа природных систем и внедрения их в проектирование объектов [2].

В качестве примера внедрения междисциплинарных исследований можно назвать Research Pavilion, возведенный в 2016 г. на базе Штутгартского университета учеными институтов вычислительного проектирования и строительных конструкций в сопровождении биологов Тюбингенского университета. В исследовании изучалась структура панциря морских ежей рода *Clupeasteroid* с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM). Именно это позволило создать легкий и прочный скелет морского ежа. В результате была предложена двухслойная конструкция из тонких деревянных реек, которые были специально изогнуты для создания двойной изогнутой жесткой оболочки [13, 14]. Конструкция подвергалась структурному анализу для определения возникающих напряжений и последующей оптимизации. Таким образом, в данном проекте реализован принцип, основанный на работе природных структур, в частности структуры тенсегрити, идеологом которой стал Бакминстер Фуллер. Тенсегрити – это сложные системы, в которых преобладающее количество элементов растянuto.

Важным фактором при проектировании архитектурных объектов с хорошими аэродинамическими характеристиками является выбор формы объекта и меры по ограничению воздействий окружающей застройки на пешеходный комфорт [5]. Примером проекта, учитывающего функциональные потребности и обеспечение аэродинамического комфорта для людей, является небоскреб Aqua Tower в Чикаго.

После долгих поисков эффективного решения проблемы влияния ветровых потоков на аэродинамический комфорт на балконах был сформирован фасад таким образом, чтобы добавление органических форм распределяло сильные потоки, уменьшало избыточную циркуляцию. Усложнение формы террас к классической прямоугольной фасадной системе создало впечатление, схожее с известняковыми осадочными формами.

Концептуальная философия Акихисы Хираты называется *Tangling*. Эта философия черпает вдохновение из того, как рыбы перемещаются среди водорослей в своей естественной среде обитания.

Хирата посвятил значительное время и усилия разработке своей концепции, в результате чего появился объем работы, который является как вдумчивым, так и инновационным в своем подходе к взаимодействию между пространствами. Архитектурное пространство «запутано» таким образом, что сохраняет связный поток и переплетение между различными пространственными элементами, их назначенными функциями и людьми, которые их используют (рис. 1). Полученная среда вызывает чувство общности и взаимосвязанности, напоминающее деревню.

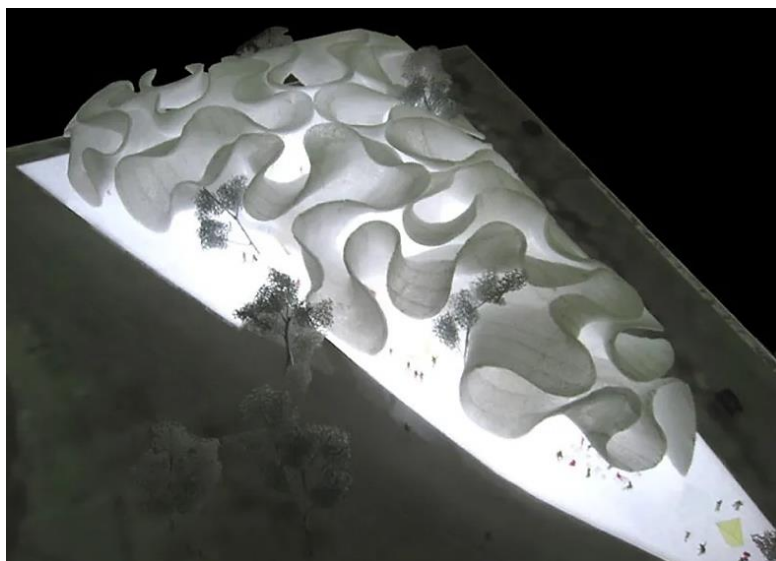


Рис. 1. Макет музея плиссированного неба<sup>1</sup>  
Fig. 1. Museum model of the pleated sky

Еще одним примером бионического проектирования является крыша общественного пространства *WestendGate* во Франкфурте-на-Майне, Германия.

Этот проект был реализован в 2010 г. архитекторами из *Just Burgeff Architekten* и *a3lab* в рамках реконструкции небоскреба с офисной и гостиничной функциями (известного как *Marriott Hotel*) [14].

Форма покрытия аналогична биоморфной мембране, схожая с ростом и формированием новых клеток. Данный дизайн смоделирован при помощи математической модели-диаграммы Вороного.

Одно из качественных внедрений бионики отмечено в проекте *Qatar Education City Convention Center* в Дохе, столице Катара (рис. 2).

Задумка архитектора Арата Исодзакки выразилась в создании такой формы здания, которая бы напоминала характерные для этой области деревья

<sup>1</sup> URL: <https://archeyes.com/pleated-sky-museum-akihisa-hirata/>

сорта баскских культурных яблонь (сидра). Для создания опор с сокращением расхода материала и оптимизации формы был использован метод EESO.

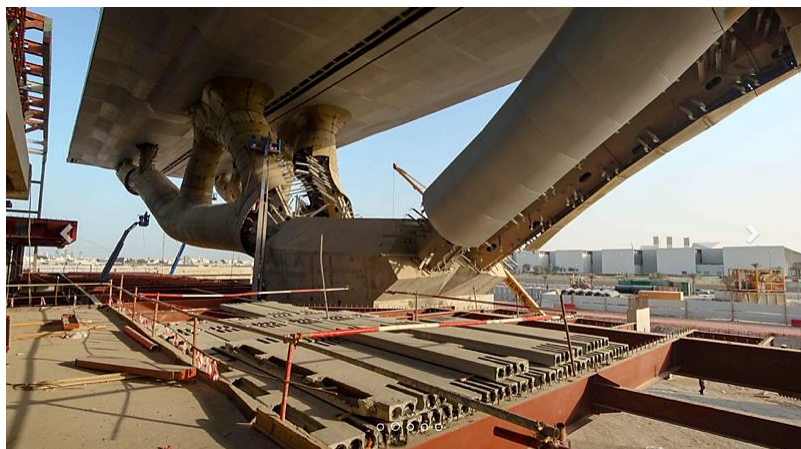


Рис. 2. Опоры Qatar Education City Convention Center в Дохе<sup>2</sup>  
Fig. 2. Supports for the Qatar Education City Convention Center in Doha

В качестве примера использования сочетания традиций и современных технологий можно назвать проект башен Аль Бахар в Абу-Даби. Главной задачей инженеров и архитекторов в рамках этого проекта было поддержание благоприятного климата внутри без больших потерь электроэнергии.

С помощью создания подвижной решетки удалось добиться решения этой задачи. Элементы данной решетки меняют свою конфигурацию в зависимости от требований пользователей и времени суток.

Фасад здания шоурума Kiefer Technic – новая работа Эрнста Гизельбрехта – послужил «водяным знаком» этих идеалов. Уникальность южного фасада в том, что он закрыт стеной из белых алюминиевых жалюзи, которые могут открываться и закрываться с использованием множества управляемых с помощью электроники горизонтальных стержней. Результат – здание, фасад которого изящен и аморфен, который механически меняется в зависимости от требований к свету и теплу внутри. Система может быть запрограммирована на отображение бесчисленного множества конфигураций образов: для выполнения будничных нужд офиса или для увлекательной анимационной демонстрации по «оживлению» фасада [4].

Новый фасад больницы Мануэля Геа Гонсалеса, спроектированный и построенный Elegant Embellishments в 2013 г., активно работает над удалением смога вокруг здания (рис. 3). Фасад состоит из плитки Prosolve 370e, материала, который имеет сверхтонкое покрытие диоксида титана, фотокаталитического вещества, которое улавливает и нейтрализует частицы смога. Этот процесс требует солнечного света, и по этой причине форма плитки была оптимизирована для получения максимально возможного количества солнечного света по всей

<sup>2</sup> URL: <https://www.margulieshoelzli.com/projects/qatar-education-city-convention-center/>

ее поверхности. Он применяет биометрический рисунок, полученный из губок и кораллов. Этот шаблон был разработан с использованием Rhino.



Рис. 3. Фасад больницы Мануэля Геа Гонсалеса<sup>3</sup>  
Fig. 3. Facade of the Manuel Gea González Hospital

Кластеры панелей были собраны на земле, а затем установлены на вертикальной сетке с другими кластерами непосредственно на фасаде. Фасад основан на узоре Вороного. Это может быть воспроизведено путем создания серии точек на поверхности.

### Заключение

Суть проблемы заключается не в тенденции усложнения форм зданий и сооружений, а в способности заменять или улучшать их, видеть тенденции развития форм архитектурных моделей с учетом благоприятного распределения ветровой нагрузки и пешеходного комфорта для снижения влияния негативных факторов. Со временем появилось все больше инструментов для цифровых методологий проектирования, что значительно повлияло на изменение вектора концептуализации процесса проектирования. Этот прогресс готов породить новые определения и новое понимание формы и материалов.

Поиск вдохновения и понимание принципов, управляющих природными структурами, может стать важным элементом формирования архитектуры. Бионические модели позволяют создавать оригинальные и оптимальные конструкции, в том числе с точки зрения аэродинамических характеристик, сформированные под влиянием существующих условий.

<sup>3</sup> URL: [https://www.iaacblog.com/wp-content/uploads/2020/11/im\\_02.jpg](https://www.iaacblog.com/wp-content/uploads/2020/11/im_02.jpg)

Несмотря на перспективы применения бионических форм, также существуют и определенные вызовы. К ним относятся: технические и экономические ограничения, необходимость междисциплинарного подхода, в том числе и сотрудничество архитекторов, инженеров, биологов; развитие в контексте устойчивого проектирования, включая интеграцию с экологическими и энерго-сберегающими технологиями.

Наша задача на сегодняшний день – направить все силы на изучение влияния особенностей форм зданий и сооружений, инструментов снижения ветровых воздействий, структур и конструкций фасада и позволить данному направлению развиваться, разумно снижать ветровые воздействия и благоприятно воздействовать на пешеходный комфорт.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беляева И.М. Архитектура фасадов современных общественных зданий с использованием металлических конструкций // Экономика строительства. 2024. Т. 4. С. 292–296.
2. Буреев А.К., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Применение структур тенсегрити в архитектуре и мостостроении // Новые идеи нового века – 2016 : материалы XVI Международной научной конференции. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. С. 200–206. ISBN: 978-5-7389-1894-0.
3. Когтева Д.В. Учет особенностей ветровых воздействий на здания и сооружения сложной формы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2022. № 2 (53). С. 87–92. DOI: 10.25628/UNIP.2022.53.2.014. EDN: JMFXXB
4. Когтева Д. Распределение ветровой нагрузки на здания сложной формы. Екатеринбург : ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2023. 132 с.
5. Лебедев Ю.С., Рабинович В.И., Положай Е.Д. Архитектурная бионика. Москва : Стройиздат, 1990. 269 с.
6. Лихая Д.А. Энергетическая эффективность динамической архитектуры // Ростовский научный журнал. 2018. Т. 3. С. 206–211.
7. Aldersey-Williams H. Towards Biomimetic Architecture // Nature Materials. 2004. V. 3. P. 277–279.
8. Bar-Cohen Y. Nature as a Model for Mimicking and Inspiration of New Technologies // Int. J. Aeronaut Space Sci. 2012. V. 13. P. 1–13. DOI: 10.5139/IJASS.2012.13.1.1
9. Bonser R.H.C. Patented Biologically-Inspired Technological Innovations a Twenty-Yearview // Journal of Bionic Engineering. 2006. № 3. P. 39–41.
10. Gawell E., Nowak A., Rokicki W. Searching for Bionics Structural Forms Optimization // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. V. 471. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052066
11. Kiuntslis R., Stepaniuk A., Besaha I. Heterochrony of Gaudi's Architecture // Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Architecture and Construction. 2024. P. 110–118. DOI: 10.31734/architecture2024.25.110
12. Knippers J., Speck T. Design and Construction Principles in Nature and Architecture // Bioinspir Biomim. 2012. № 7. P. 1–10.
13. Kravtsov D., Tsvihovska I. Prerequisites for the Formation and Development of Bionics in Architecture // Regional Problems of Architecture and Urban Planning. 2022. P. 106–113. DOI: 10.31650/2707-403X-2022-16-106-113
14. Nowak A., Rokicki W. Bionic Forms in Search of Structural Models in Architecture // 3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering. 2018. V. 174. DOI: 10.1051/mateconf/201817403020
15. Pan H. Exploring Bionic Architecture Inspired by Nature // Journal of Architecture and Construction. 2024. V. 4. P. 25–37.
16. Rezazadeh H., Kolahkaj M., Kordjamshidi M. A Historical Review on Bionic Structures // Bionic. The Third Conference on Architecture and Structure. 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/302225008\\_A\\_Historical\\_Review\\_on\\_Bionic\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/302225008_A_Historical_Review_on_Bionic_Structures) (дата обращения: 25.03.2025).



17. Rokicki W., Nowak A. Bionic Aspects in Search of Functional Systems of Structural Surfaces // Mazowsze. Studia Regionalne. 2016. P. 117–124. DOI: 10.21858/msr.19.07
18. Sadri M., Kavandi M., Jozepiri A., Teimouri S., Abbasi F. Bionic Architecture, Forms and Constructions // Research Journal of Recent Sciences. 2014. V. 3 (3). P. 93–98.

## REFERENCES

1. Belenya I.M. Facades Architecture of Modern Public Buildings based on Metal Structures. *Ekonomika stroitel'stva*. 2024; 4: 292–296. (In Russian)
2. Bureev A.K., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. The Use of Tensegrity Structures in Architecture and Bridge Construction. In: *Proc. 16th Int. Sci. Conf. 'New Ideas of the New Century'*. Khabarovsk, 2015. Pp. 200–206. ISBN 978-5-7389-1894-0. (In Russian)
3. Kogteva D.V. Accounting for Specific Characteristics of Wind Effects on Buildings with Complex Shape. *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2022; 2 (53): 87–92. DOI: 10.25628/UNIIP.2022.53.2.014. EDN: JMFXXB (In Russian)
4. Kogteva D.V. Distribution of Wind Loads on Buildings with Complex Shape. Ekaterinburg, 2023. Pp. 127–132. (In Russian)
5. Lebedev Yu.S. (Ed.), Rabinovich V.I., Polozhai E.D., et al. Bionic Architecture. Moscow: Stroizdat, 1990. 269 p. (In Russian)
6. Likhaya D.A. Energy Efficiency of Dynamic Architecture. *Rostovskii nauchnyi zhurnal*. 2018; 3: 206–211. (In Russian)
7. Aldersey-Williams H. Towards Biomimetic Architecture. *Nature Materials*. 2004; 3(5): 277–279.
8. Bar-Cohen Y. Nature as a Model for Mimicking and Inspiration of New Technologies. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2012. 13(1): 1–13. DOI: 10.5139/IJASS.2012.13.1.1
9. Bonser R.H.C. Patented Biologically-Inspired Technological Innovations: A Twenty-Year View. *Journal of Bionic Engineering*. 2006; (3): 39–41.
10. Gawell E., Nowak A., Rokicki W. Searching for Bionics Structural Forms Optimization. *IOP Conference Ser. Materials Science and Engineering*. 2019; 471. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052066
11. Kiuntsli R., Stepaniuk A., Besaha I. Heterochrony of Gaudi's Architecture. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Ser. Architecture and Construction*. 2024; 110–118. DOI: 10.31734/architecture2024.25.110
12. Knippers J., Speck T. Design and Construction Principles in Nature and Architecture. *Bioinspir Biomim*. 2012; (7): 1–10.
13. Kravtsov D., Tsvihovska I. Prerequisites for the Formation and Development of Bionics in Architecture. In: *Regional Problems of Architecture and Urban Planning*. 2022. Pp. 106–113. DOI: 10.31650/2707-403X-2022-16-106-113
14. Nowak A., Rokicki W. Bionic Forms in Search of Structural Models in Architecture. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 174: 03020. DOI: 10.1051/mateconf/201817403020
15. Pan H. Exploring Bionic Architecture Inspired by Nature. *Journal of Architecture and Construction*. 2024; 4: 25–37.
16. Rezazadeh H., Kolahkaj M., Kordjamshidi M. A Historical Review on Bionic Structures. Bionic. In *Proc. 3rd Conf. on Architecture and Structure*. 2016. Available: [www.researchgate.net/publication/302225008\\_A\\_Historical\\_Review\\_on\\_Bionic\\_Structures](http://www.researchgate.net/publication/302225008_A_Historical_Review_on_Bionic_Structures) (accessed March 25, 2025).
17. Rokicki W., Nowak A. Bionic Aspects in Search of Functional Systems of Structural Surfaces. MAZOWSZE Studia Regionalne. 2016. Pp. 117–124. DOI: 10.21858/msr.19.07
18. Sadri M., Kavandi M., Jozepiri A., Teimouri S., Abbasi F. Bionic Architecture, Forms and Constructions. *Research Journal of Recent Sciences*. 2014; 3 (3): 93–98.

## Сведения об авторах

Беляева Зоя Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по науке и инновациям, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, z.v.beliaeva@urfu.ru

*Когтева Дарья Викторовна*, аспирант, инженер, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, kdaryav@inbox.ru

#### **Authors Details**

*Zoya V. Belyaeva*, PhD, A/Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, 19, Mira Str., 620062, Ekaterinburg, Russia, z.v.beliaeva@urfu.ru

*Darya V. Kogteva*, Research Assistant, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, 19, Mira Str., 620062, Ekaterinburg, Russia, kdaryav@inbox.ru

#### **Вклад авторов**

*Беляева З.В.* – концепция исследования, общее руководство работой, методология, проверка и утверждение выводов, редактирование финального текста.

*Когтева Д.В.* – сбор и систематизация литературных источников, проведение анализа данных, подготовка исходного текста рукописи, оформление списка литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Authors contributions**

*Belyaeva Z.V.* – conceptualization, supervision, methodology, validation, writing – review and editing.

*Kogteva D.V.* – literature curation, formal analysis, writing – original draft preparation.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.02.2025  
Одобрена после рецензирования 11.03.2025  
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 15.02.2025  
Approved after review 11.03.2025  
Accepted for publication 27.05.2025



Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 21–36.

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 (5): 21–36.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727.012

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-21-36

EDN: AHVFUU

# АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ МОЛОДЕЖНЫХ ЦЕНТРОВ

**Елена Сергеевна Духанина**

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

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена возрастающим значением молодежных центров как площадок для культурного обмена, социальной интеграции и формирования гражданской активности молодежи.

**Целью** статьи является анализ современных архитектурных проектов молодежных центров в России. Подчеркнута важность учета локальной идентичности при проектировании молодежных центров, гибкости пространства и участия молодежи в процессе создания центров.

**В результате** исследования выявлены ключевые архитектурно-планировочные принципы создания многофункциональных молодежных центров, которые соответствуют требованиям современного общества и способствуют воспитанию патриотизма и культурному развитию страны.

**Ключевые слова:** молодежные центры, архитектура, архитектурно-планировочные принципы организации молодежных центров, проектирование молодежных центров, многофункциональные пространства для молодежи

**Для цитирования:** Духанина Е.С. Архитектурно-планировочные принципы организации молодежных центров // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 21–36. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-21-36. EDN: AHVFUU

## ORIGINAL ARTICLE

# ARCHITECTURAL AND PLANNING PRINCIPLES OF YOUTH CENTRES

**Elena S. Dukhanina**

*Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** Youth Centres are important platforms for cultural exchange, social integration and the development of civic engagement among young people.

**Purpose:** The aim of the work is to analyze a contemporary architectural design for Youth Centres in Russia. The paper emphasizes the importance of taking the local identity into account in designing Youth Centres, space flexibility and participation of young people in the creation of such centres.

*Research findings:* The paper identifies the key principles of architecture and planning for the creation of multifunctional Youth Centres that meet the requirements of the modern society and contribute to the cultivation of patriotism and the cultural development of the country.

**Keywords:** multifunctional youth center, architecture, architectural and planning principles

**For citation:** Dukhanina E.S. Architectural and Planning Principles of Youth Centres. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 21–36. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-21-36. EDN: AHVFUU

В современном мире молодежные центры становятся необходимыми пространствами, способствующими социальному взаимодействию, развитию и самовыражению молодежи. Они не только обеспечивают молодым людям поддержку, обучение и культурный обмен, но и отвечают запросам таких национальных проектов, как «Молодежь и дети»<sup>1</sup>, «Культура»<sup>2</sup>, в состав которых входят три федеральных проекта: «Культурная среда», «Творческие люди» и «Цифровая культура». Интересным опытом в сфере развития молодежной политики стал Всероссийский конкурс программ комплексного развития молодежной политики «Регион для молодых» от Росмолодежи, целью которого был поиск идей по обновлению или созданию удобной среды для подрастающих талантов России. За 2022–2024 гг. было поддержано 66 субъектов Российской Федерации, отремонтировано 172 молодежных центра, организовано более 5 тысяч проектов для молодежи. Все это говорит о востребованности творческих и образовательных пространств для молодежи и перспективности их строительства.

Основам проектирования общественных зданий и сооружений посвящены труды А.А. Архиповой [1], Б.Г. Бархина [2], А.Л. Гельфонд [3], С.Г. Змеула [4], М.С. Нагорной, Е.И. Петуховой [5], Е.С. Свечкар [6], в которых были рассмотрены особенности архитектуры зданий для досуга молодежи как в отечественной, так и зарубежной практике. Также стоит отметить работу Д.С. Мосякина [7], посвященную формированию модульных универсальных молодежных центров. С.В. Ильвицкая, А.П. Зайцева [8] исследовали трансформацию концепции молодежного пространства в современной городской среде.

Целью настоящей статьи является выявление архитектурно-планировочных принципов организации молодежных центров в российской практике. Для этого определим целевую аудиторию и принципы работы многофункционального молодежного центра, рассмотрим проекты молодежных центров и выделим принципы их архитектурно-планировочной организации, сформулируем, почему молодежный центр является перспективным типом клубных зданий.

<sup>1</sup> Национальный проект «Молодежь и дети» направлен на становление и развитие поколения российских граждан, патриотически настроенного, высоконравственного и ответственного, способного обеспечить суверенитет, конкурентоспособность и дальнейшее развитие России. Подробнее: <http://government.ru/rugovclassifier/914/about/>

<sup>2</sup> Национальный проект «Культура» направлен на сохранение и развитие культурного наследия России, поддержку современных художественных и культурных инициатив. Подробнее: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/projects/kultura/>

Формат досуговых учреждений существует с начала XX в. С 1920-х гг. на базе детских клубов стали открываться дворцы и дома пионеров и школьников, которые стали частью внешкольных учреждений системы министерств просвещения (народного образования) союзных республик. Среди первых в стране появился Дворец пионеров и октябрят, открытый в 1935 г. в Харькове, Дворец пионеров и школьников в Таганроге (1936 г.), Дворец пионеров в Одессе (1936 г.), Дворец пионеров в Ленинграде (1937 г.). Однако дома и дворцы пионеров, прежде всего, выполняли функцию внешкольного образования и воспитания, поэтому их типология близка к учреждениям дополнительного образования.

О необходимости строительства дворцов молодежи как досуговых организаций для молодых граждан впервые стали говорить в 1950-х, а массовое строительство началось в 1960-х гг. Дворец молодежи задумывался как многофункциональный комплекс, предназначенный для всех видов отдыха и досуга советских граждан в возрасте от 14 до 28 лет. Одними из первых дворцы молодежи появились в Москве, Ленинграде, Свердловске.

Сегодня одним из популярных и перспективных типов досуговых учреждений для молодых людей являются молодежные центры. После длительной паузы в строительстве досуговых учреждений молодежи в России сегодня наблюдается активный спрос на молодежные центры и арт-резиденции. Долгое время не было единого документа, который описывал бы деятельность учреждений досуга молодежи, обобщил опыт работы таких организаций. В 2022 г. вышел Стандарт учреждения молодежной политики, разработанный Федеральным агентством по делам молодежи (Росмолодежь), в котором впервые намечены направления деятельности учреждений молодежной политики, среди которых выделено 7 основных типов учреждений:

- многофункциональный молодежный центр;
- молодежный центр / подростковый досуговый центр / молодежное пространство;
- арт-резиденция / креативное пространство;
- центр психологической поддержки;
- центр патриотического воспитания;
- центр добровольчества;
- стационарный лагерь [9].

Целевая аудитория молодежного центра, согласно Стандарту учреждений молодежной политики, – это школьники, студенты, творческая работающая молодежь, фрилансеры и специалисты, работающие удаленно, молодые семьи, родители детей и молодежи, руководители или члены общественных объединений, неформальные молодежные объединения. Как видно, молодежный центр включает в себя разные категории посетителей, поэтому пространство молодежного центра должно быть универсальным и гибким.

В связи с новыми социально-демографическими, политическими и экономическими условиями сегодня учреждения клубного типа, в том числе и досуговые учреждения для молодежи, основываются на следующих принципах:

- 1) современный клуб – место для развития, где собраны модные и востребованные форматы интеллектуального и творческого досуга (лектории, проектные лаборатории, хабы и др.);

2) современный клуб – площадка для образования, развития собственных творческих идей, создания стартапа или формирования команды для будущего дела (коворкинг, зоны для мастер-классов, рабочее пространство и др.);

3) современный клуб – место для «тусовки», выстраивания социальных связей, общения с единомышленниками и профессионалами в разных областях, возможность организации совместных выставок и просмотров (зоны отдыха, кафетерий или антикафе и др.);

4) современный клуб – место для культуры, где формируются ценности поколения [10].

Молодежные центры могут представлять собой отдельно стоящие здания, могут быть пристроены к уже существующим либо быть в составе крупного многофункционального комплекса. Сегодня особенно актуально адаптировать бывшие клубные здания или здания другого функционального назначения для молодежных центров.

Если посмотреть на молодежный центр с позиции типологии общественных зданий, то его можно определить как клубное здание с развитой специализированной функцией. Выделим основные функционально-планировочные блоки (рис. 1).

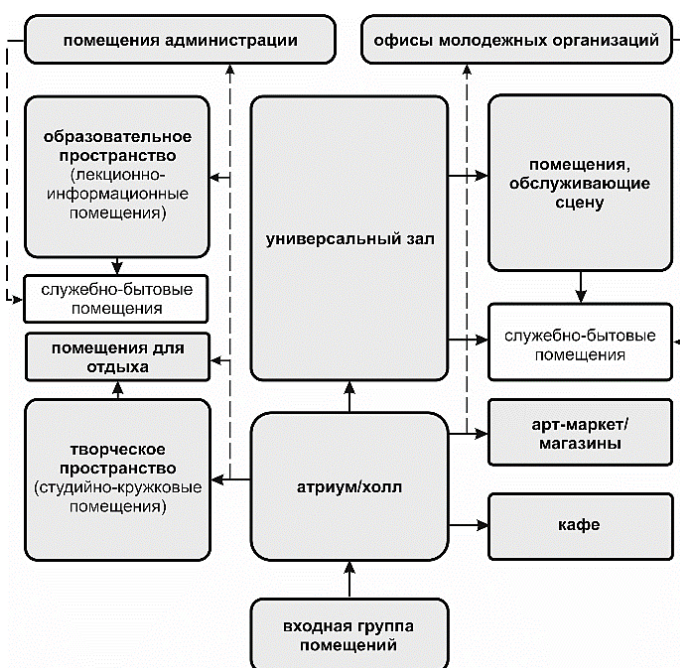


Рис. 1. Функционально-планировочная схема многофункционального молодежного центра

Fig. 1. Flow chart of multifunctional Youth Centre

*Входная группа помещений* включает в себя вестибюль или лобби, зону ресепшен, помещение охраны, гардероб и служебно-бытовые помещения.

Далее следуют два крупных и основополагающих блока помещений: лекционно-информационные помещения и студийно-кружковые помещения.

К лекционно-информационным помещениям относятся библиотека, конференц-зал, образовательные хабы или универсальные классы с возможностью групповой работы. Отдельное внимание сегодня уделяется вопросу о патриотическом воспитании, поэтому в образовательном пространстве стоит предусмотреть помещение для центра патриотического воспитания.

Студийно-кружковые помещения включают малый универсальный зал с гримерными и складским помещением, репетиционные залы, мастерские и студии, коворкинг, помещения для отдыха.

Помещения зрительского комплекса включают в себя холл, кафе или буфет, универсальный зрительный зал, помещения, обслуживающие сцену.

Служебно-бытовые помещения являются вспомогательными и находятся в каждом функциональном блоке. Помещения администрации представляют собой офисы, в которых возможно разместить и штабы молодежных организаций.

Кроме этого, возможно размещение спортивного блока помещений со спортивным или тренажерным залом, раздевалками и тренерскими.

Если проанализировать проекты молодежных центров в России за последние 20 лет, можно увидеть тенденцию к модернизации системы клубных учреждений, в частности домов и дворцов молодежи. Поэтому наиболее востребованными оказываются проекты по реновации и реконструкции советских зданий. Среди таких проектов можно выделить проект реконструкции Областного молодежного центра «Полет» в г. Орле, проект реконструкции молодежного центра (бывшего Дома пионеров) в Волновахе (Донецкая Народная Республика). Также реконструкция иногда предполагает адаптацию зданий другой типологии под новые функции. Так были разработаны проекты молодежного центра в Новой Усмани, архитектурная концепция молодежного центра «АНГАР» в г. Анадьре. Однако в рамках национальных программ происходит и строительство новых центров, таких как арт-резиденции «Полярис» в Салехарде и «Миксер» в Ноябрьске, Региональный центр патриотического воспитания в Вологде.

В качестве примера консервативной реконструкции молодежного центра рассмотрим проект областного молодежного центра «Полет» в г. Орле. Он возник как небольшой заводской клуб в промышленной зоне на некотором отдалении от центра Орла. К Олимпиаде 1980 г. его решили расширить, затем строение перешло в собственность города и в 2013 г. было закрыто, т. к. уже не отвечало требованиям безопасности и использовать его было возможно только в летнее время. В 2023 г. администрация города провела тендер на разработку проекта реконструкции, по результатам которого заказ получило бюро «Мезонпроект». Текущее состояние объекта не позволило сохранить здание целиком, поэтому в проекте оставили только часть фундамента и декоративную мозаику советского времени. В новом проекте центра архитекторы сохранили историческую стилистику, подчеркнули «ажурность и прозрачность» конструкций, добавили современности за счет экспрессивной кровли. Перед входом будут организована площадь и общественная зона с амфитеатром, что даст возможность проводить различные мероприятия под открытым небом [11] (рис. 2–4).

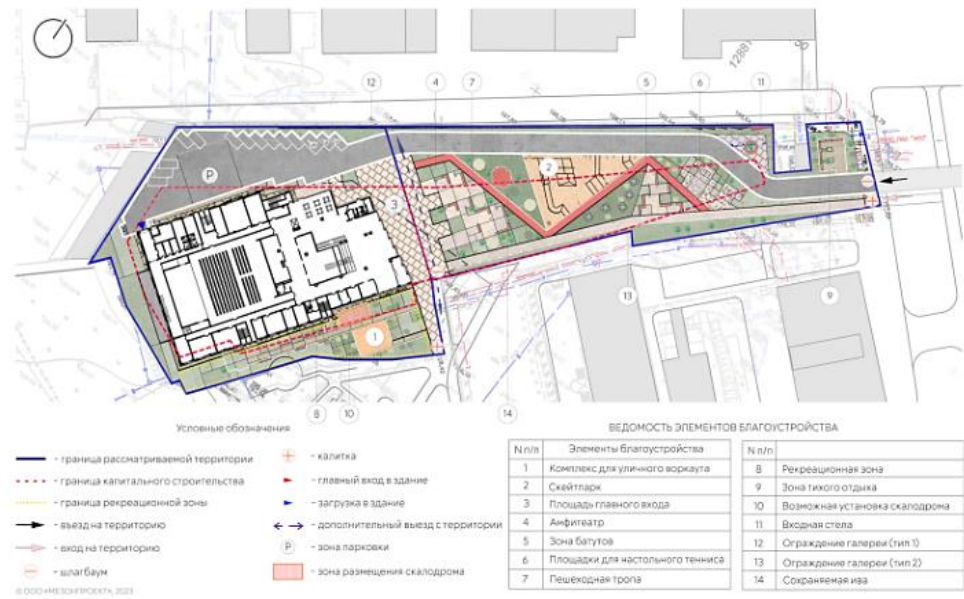


Рис. 2. Проект областного молодежного центра «Полет». Общий план<sup>3</sup>  
 Fig. 2. Design project of the regional Youth Center “Polet”



Рис. 3. Архитектурные визуализации областного молодежного центра «Полет». Общий вид [11]  
 Fig. 3. Architectural visualization of the regional Youth Center “Polet”

<sup>3</sup> URL: <https://archi.ru/projects/russia/19007/orlovskii-oblastnoi-centr-molodozhi-polot>





Рис. 4. Архитектурные визуализации областного молодежного центра «Полет». Амфитеатр и главный фасад [11]

Fig. 4. Amphitheater and façade of the regional youth center “Polet”

В планировочном решении центра появится полноценный подземный этаж, в котором расположится фитнес-центр, а также учебные студии звукозаписи и видеомонтажа. Концертный зал, рассчитанный на 600 мест с телескопическими первыми рядами для многофункционального использования зала, остается в тех же габаритах. По бокам от зала и вокруг большого атриума прямо перед ним на трех уровнях расположатся различные функциональные зоны: входная зона, помещения для обслуживания сцены, помещения администрации и отдела по работе с молодежью, кафе, коворкинг, большой двусветный зал для занятий хореографией (рис. 5, 6).



Рис. 5. Проект областного молодежного центра «Полет». Визуализация интерьера атриума [11]

Fig. 5. Atrium of the regional youth center “Polet”

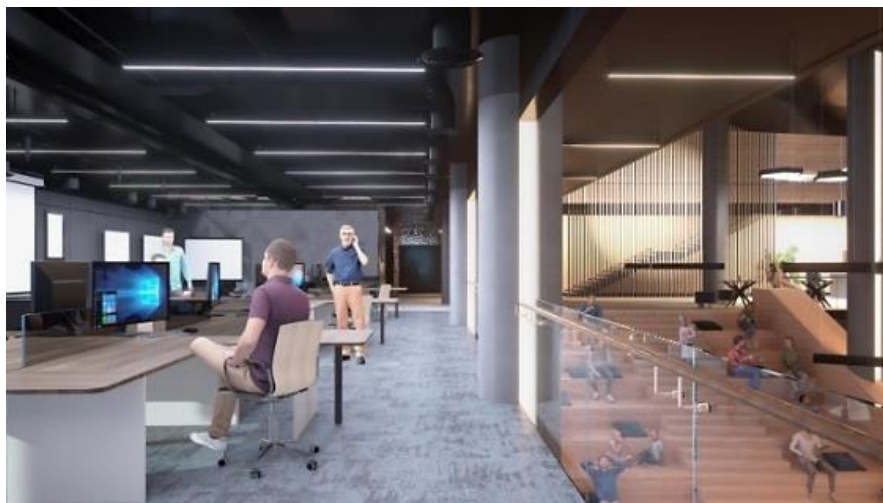


Рис. 6. Проект областного молодежного центра «Полет». Визуализация интерьера коворкинга [11]  
Fig. 6. Design project of the Youth Center coworking office in "Polet"

Проект молодежного центра в Новой Усмани, разработанный в 2024 г. архитектурным бюро Better, является примером приспособления здания под современные функции. Заказчиком выступило Управление молодежной политики Воронежской области. В качестве площадки рассматривались только имеющиеся здания и помещения в районных центрах. Так, дом 1950-х гг. был реконструирован под молодежное пространство. Авторы проекта хотели максимально сохранить исторический характер этого места и аутентичность дома, а также соблюсти баланс между духом старины и современным видением молодежного пространства (рис. 7).



Рис. 7. Проект молодежного центра в Новой Усмани. Архитектурная визуализация [12]  
Fig. 7. Design project of the Youth Center architecture in Novaya Usman'



Интересным архитектурным приемом здесь можно выделить устройство парадной входной группы в виде широкого навеса, объединенного в одну композицию с гаражными постройками сбоку. Таким образом авторы получили привлекающую внимание доминанту, разместили крытый пандус для безбарьерного попадания внутрь и объединили входную группу с пространством перед зданием (рис. 8). Фирменный цвет, используемый в оформлении входной группы и приглашающей площадки перед зданием, подчеркивает идентичность центра и делает его узнаваемым [12].

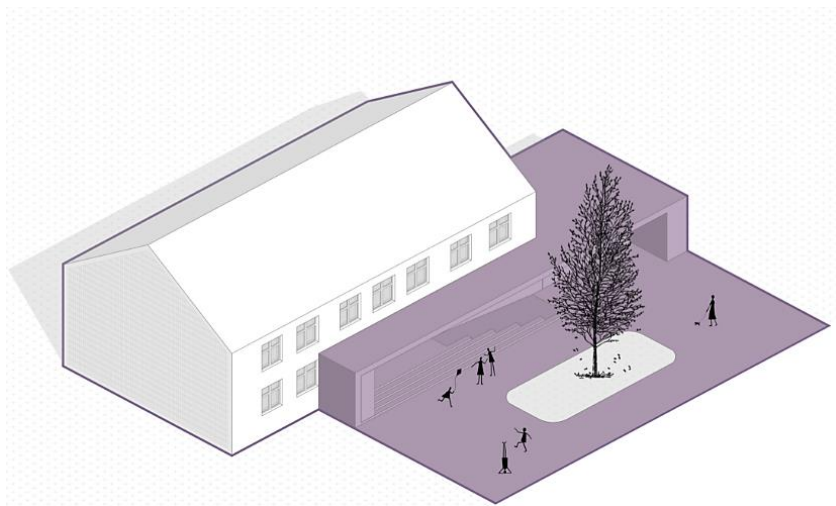


Рис. 8. Проект молодежного центра в Новой Усмани. Аксонометрия [12]

Fig. 8. Axonometry of the Youth Center architecture in Novaya Usman'

Заказчиком концепции неформального *молодежного пространства* «АНГАР» в Анадыре (рис. 9) выступила местная администрация. Перед архитекторами была поставлена задача – превратить неиспользуемое здание бывшего гаража на территории Чукоткоммунхоза, расположенного в середине промзоны на краю города, в современное и инновационное общественное пространство под названием «АНГАР». Перед началом проектирования была проведена большая работа по общению с местным сообществом: специалисты агентства «Центр» собрали и проанализировали как глобальную информацию о социально-экономических особенностях города, так и точечную о запросах будущих участников проекта и об объекте. Таким образом, «АНГАР» должен создать такую среду, которая позволит молодежи не только удовлетворять разнообразные досуговые запросы, но и реализовать себя в тех видах деятельности, которые будут востребованы в будущем.

Над созданием архитектурного проекта работала команда MAParchitects. Внешний вид здания сочетает современный дизайн с элементами его промышленного прошлого. В основу решения фасадов лег архитектурный образ «вырезанного из снега прямоугольного блока» [13]. Этот образ решен за счет перфорированных металлических панелей, дополнительно контраст добавляет вход из красного кирпича (рис. 10, 11).

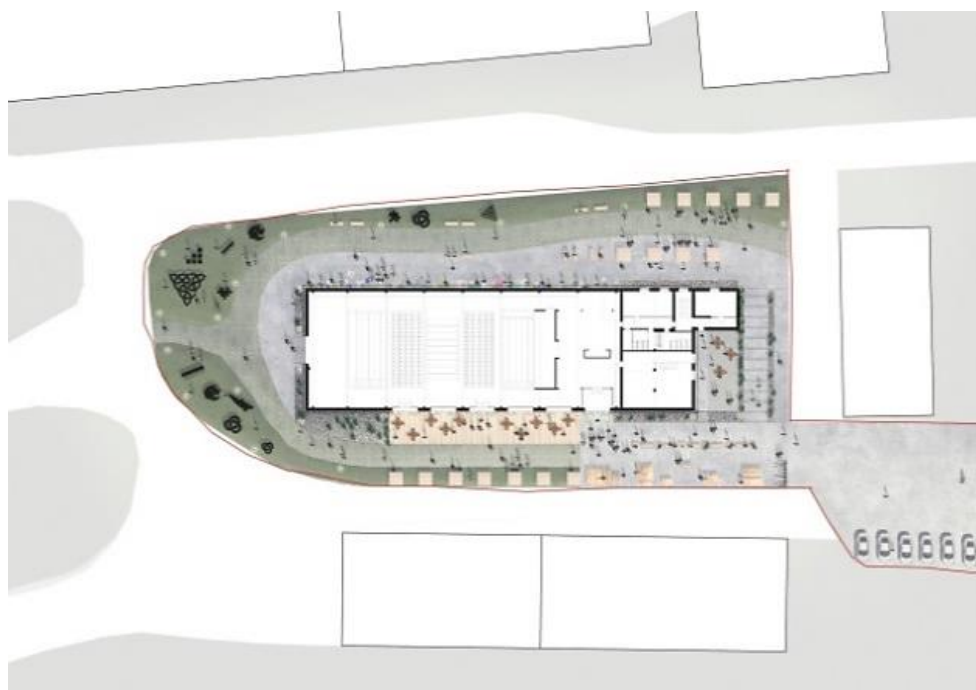


Рис. 9. Проект молодежного пространства «АНГАР» в Анадыре. Общий план [13]  
Fig. 9. Plan view of “Angar” Youth Center in Anadir



Рис. 10. Проект молодежного пространства «АНГАР» в Анадыре. Визуализации экстерьера [13]  
Fig. 10. Design project of “Angar” Youth Center in Anadir



Рис. 11. Проект молодежного пространства «АНГАР» в Анадыре. Главный вход [13]  
Fig. 11. Design project of the entrance of “Angar” Youth Center in Anadir

Центр будет служить «третьим местом» для общения, творчества и культурных мероприятий. Первый этаж представляет собой открытое пространство с амфитеатрами и медийным экраном, оно будет трансформироваться под необходимое мероприятие (рис. 12, 13). Мастерские и студии расположены на антресоли по периметру основного пространства.

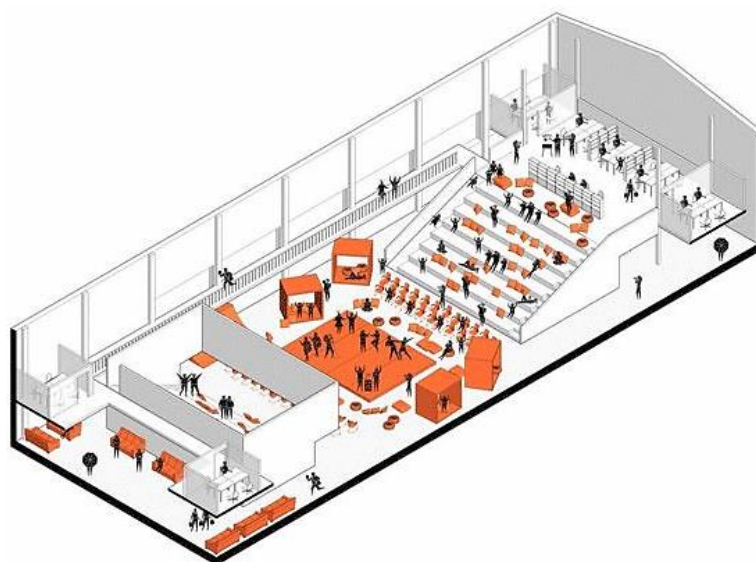


Рис. 12. Проект молодежного пространства «АНГАР» в Анадыре. Вариант использования основного пространства для ярмарки [13]  
Fig. 12. Design project of “Angar” Youth Center in Anadir with the market space



Рис. 13. Проект молодежного пространства «АНГАР» в Анадыре. Вариант использования основного пространства для мероприятия, например, кинофестиваля [13]  
 Fig. 13. Design project of "Angar" Youth Center in Anadir with the film festival space

Проект включает в себя разнообразные мероприятия от кинофестивалей до уличных выставок, что способствует культурному обмену и укреплению общественных связей (рис. 14, 15). Внешний вид здания будет сочетать современный дизайн с элементами его промышленного прошлого, создавая привлекательное и теплое место для жителей Чукотки.



Рис. 14. Проект молодежного пространства «АНГАР» в Анадыре. Визуализация интерьера основного пространства для ярмарки [13]  
 Fig. 14. Design project of "Angar" Youth Center in Anadir with the market space





Рис. 15. Проект молодежного пространства «АНГАР» в Анадыре. Визуализации интерьера основного пространства для кинофестиваля [13]

Fig. 15. Design project of “Angar” Youth Center in Anadir with the film festival space

На основе рассмотренных проектов молодежных центров автор выделяет *архитектурно-планировочные принципы* организации молодежных центров.

1. Принцип отражения локальной идентичности. Он основан на создании архитектурных пространств, которые учитывают и подчеркивают уникальную культуру и историю конкретного региона или сообщества. Этот принцип важен для формирования чувства принадлежности у жителей и создания гармоничной среды, которая будет восприниматься как часть местной культуры.

2. Принцип «бережной» реконструкции. Принцип «бережной» реконструкции в архитектуре и градостроительстве подразумевает подход к обновлению и восстановлению существующих зданий и территорий с акцентом на сохранение их исторической, культурной и архитектурной ценности.

3. Принцип гибкости. Этот принцип подразумевает создание многофункциональных зон: универсальный зал и творческие пространства должны быть адаптируемыми для различных мероприятий (мастер-классы, лекции, выставки). Использование мобильной мебели и перегородок позволяет легко изменять конфигурацию помещений, сохраняя их востребованность и в будущем.

4. Принцип многофункциональности. Принцип реализуется частично с помощью универсальных пространств, способных выполнять различные функции, и различных типов пространств – открытые зоны, зоны отдыха, зоны для работы в группах и индивидуально.

5. Принцип взаимодействия. Архитекторы акцентируют внимание на важности взаимодействия с молодежью и жителями региона, что позволяет создавать пространство, отвечающее их потребностям.

6. Принцип социальной интеграции. Открытые пространства и общие зоны, такие как кафе, лаунж-зоны или площадки для мероприятий, необходимы для общения молодежи, а также способствуют формированию сообщества.

В условиях быстро меняющегося мира молодежные центры становятся важными площадками для формирования новых идей, культурного обмена и социальной интеграции молодого поколения. Молодежные центры являются перспективным типом клубных зданий по нескольким причинам.

1. Ориентация на потребности молодежи. Молодежные центры планируются с учетом современных потребностей и интересов молодежи, что делает их более привлекательными для целевой аудитории. На первых этапах проектирования необходимо выяснить потребности населения конкретной местности, определить функциональный состав помещений.

2. Многофункциональность. Молодежные центры могут выполнять множество функций: от образовательных и культурных до спортивных и социальных. Это позволяет им привлекать широкую аудиторию и адаптироваться к изменяющимся потребностям молодежи. Многофункциональность выражается в универсальности пространств и возможности их трансформации под различные сценарии или адаптацию здания под другое функциональное назначение в будущем.

3. Социальная интеграция. Молодежные центры способствуют социальной интеграции и взаимодействию между пользователями здания. Они должны включать неформальные мероприятия и пространства для общения, обмена идеями и формирования социальных связей.

4. Формирование качественной архитектурной среды. Комплексный процесс, который включает в себя проектирование и создание комфортной, функциональной и вдохновляющей среды для молодежи. Качественная архитектурная среда должна способствовать развитию творческого потенциала, социальной активности и взаимодействию между молодыми людьми.

5. Использование современных методов и инновационных подходов в работе. Современные молодежные центры часто применяют инновационные подходы в организации пространства и программ. Это может включать креативные пространства, арт-резиденции и коворкинги, что делает их привлекательными для молодежи, стремящейся к новым формам самовыражения и сотрудничества. Молодежные центры могут служить платформой для реализации молодежных инициатив и проектов. Они предоставляют ресурсы и поддержку для стартапов, волонтерских движений и социальных проектов, что способствует активному гражданскому участию и развитию лидерских качеств у молодежи.

6. Патриотическое и культурное воспитание. Молодежные центры могут играть важную роль в патриотическом воспитании и культурном развитии молодежи, предлагая программы, направленные на изучение истории, культуры и традиций своей страны. Это способствует формированию гражданской идентичности и ответственности.

7. Доступность и инклюзивность. Молодежные центры должны быть спроектированы с учетом принципов доступности и инклюзивности, что позволяет

привлекать аудиторию с различными потребностями, включая людей с ограниченными возможностями. Это создает более разнообразное и открытое сообщество.

Таким образом, молодежные центры представляют собой перспективный тип клубных зданий благодаря своей способности адаптироваться к потребностям молодежи, многофункциональности, поддержке инициатив и инновационным подходам. Они играют важную роль в социальном, культурном и личностном развитии молодежи, что делает их значимыми для современного общества. Такие здания могут легко адаптироваться под новые функции в будущем.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Архипова А.А.* Опыт строительства зданий для досуга молодежи // *Жилищное строительство*. 2018. № 11. С. 22–28. EDN: YQGVZZ
2. *Адамович В.В., Бархин Б.Г., Варезкин В.А. и др.* Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Стройиздат, 1984. 543 с.
3. *Гельфонд А.Л.* Архитектурная типология общественных зданий и сооружений. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2003. 201 с.
4. *Змеул С.Г., Маханько Б.А.* Архитектурная типология зданий и сооружений. Изд. стереотип. Москва : Архитектура-С, 2004. 240 с. ISBN 5-9647-0050-0.
5. *Нагорная М.С., Петухова Е.И.* Современные архитектурно-стилистические тенденции в проектировании молодежных центров: зарубежный опыт // *Вестник СМУС74*. 2016. Т. 1. № 4 (15). С. 8–11. EDN: XHUCBL
6. *Свечкарёв Е.С.* Особенности формирования современных молодежных центров // *AMIT*. 2022. № 3 (60). С. 112–126. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-3-112-126
7. *Мосякин Д.С.* Особенности формирования модульных универсальных молодежных центров // *Строительство и техногенная безопасность*. 2021. № 23 (75). С. 5–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-modulnyh-universalnyh-molodezhnyh-tsentrov> (дата обращения: 12.04.2025).
8. *Ильвицкая С.В., Зайцева А.П.* Трансформация концепции молодежного пространства в современной городской среде // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020. № 4 (53). С. 168–181. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15310
9. *Аверков М.С., Бажитов Н.В., Богомаз Е.Е. и др.* Стандарт учреждения молодежной политики; Федеральное агентство по делам молодежи (Росмолодежь). Москва : Институт молодежной политики – Институт молодежи, 2022. 168 с. ISBN 978-5-907691-00-1.
10. *Современные принципы работы молодежного центра*. URL: [https://rcmipp.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub\\_2250723.pdf](https://rcmipp.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2250723.pdf) (дата обращения: 03.04.2025).
11. *Орловский областной центр молодежи «Полёт»* // *archi.ru* : [сайт]. URL: <https://archi.ru/projects/russia/19007/orlovskii-oblastnoi-centr-molodozhi-polot> (дата обращения: 03.04.2025).
12. *Молодежный центр в Новой Усмани* // *archi.ru* : [сайт]. URL: <https://archi.ru/projects/russia/19423/molodezhnyi-centr-v-novoi-usmani> (дата обращения: 03.04.2025).
13. *Молодежный общественный центр АНГАР* // *archi.ru* : [сайт]. URL: <https://archi.ru/projects/russia/14881/molodezhnyi-obschestvennyi-centr-angar> (дата обращения: 03.04.2025).

#### REFERENCES

1. *Arkhipova A.A.* Experience in Building Construction for Youth Leisure. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2018; (11): 22–28. EDN: YQGVZZ (In Russian)
2. *Adamovich V.V., Barkhin B.G., Varezkin V.A., et al.* Architectural Design of Public Buildings. 2nd edn. Moscow: Stroiizdat, 1984. 543 p. (In Russian)
3. *Gel'fond A.L.* Architectural Typology of Buildings. Nizhnii Novgorod, 2003. 201 p. (In Russian)
4. *Zmeul S.G., Makhan'ko B.A.* Architectural Typology of Buildings and Structures. Stereotype edn. Moscow: Arkhitektura-S, 2004. 240 p. ISBN 5-9647-0050-0. (In Russian)
5. *Nagornaya M.S., Petukhova E.I.* Contemporary Architectural and Stylistic Trends in Youth Centre Design: International Experience. *Vestnik SMUS74*. 2016; 1 (4 (15)): 8–11. EDN: XHUCBL (In Russian)

6. Svehkar' E.S. Creation of Modern Youth Centres. *AMIT*. 2022; 3 (60): 112–126. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-3-112-126 (In Russian)
7. Mosyakin D.S. Creation of Modular Universal Youth Centres. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2021; 23 (75): 5–12. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-modulnyh-universalnyh-molodezhnyh-tsentrov> (accessed April 12, 2025). (In Russian)
8. Il'vitskaya S.V., Zaitseva A.P. Concept Transformation of the Youth Space in Modern Urban Environment. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020; 4 (53): 168–181. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15310 (In Russian)
9. Averkov M.S., Bazhitov N.V., Bogomaz E.E., et al. Youth Policy Standard. Federal Agency for Youth Affairs (Rosmolodezh'). Moscow, 2022. 168 p. ISBN 978-5-907691-00-1. (In Russian)
10. Modern principles of youth centre operation. Available: [https://rcmipp.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub\\_2250723.pdf](https://rcmipp.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2250723.pdf) (accessed April 3, 2025). (In Russian)
11. Orlovsk Regional Youth Center “Polet”. Available: <https://archi.ru/projects/russia/19007/orlovskii-oblastnoi-centr-molodozhi-polot> (accessed April 3, 2025). (In Russian)
12. The Youth Center in Novaya Usman'. Available: <https://archi.ru/projects/russia/19423/molodezhnyi-centr-v-novoi-usmani> (accessed April 3, 2025). (In Russian)
13. Youth Public Center “Angar”. Available: <https://archi.ru/projects/russia/14881/molodezhnyi-obshchestvennyi-centr-angar> (accessed April 3, 2025). (In Russian)

#### Сведения об авторе

Духанина Елена Сергеевна, доцент, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, 630099, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, e.dukhanina@nsu.ru

#### Author Details

Elena S. Dukhanina, A/Professor, Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, e.dukhanina@nsu.ru

Статья поступила в редакцию 14.04.2025  
Одобрена после рецензирования 26.05.2025  
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 14.04.2025  
Approved after review 26.05.2025  
Accepted for publication 27.05.2025



Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 37–49.

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 (5): 37–49.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727.3+378.16

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-37-49

EDN: BDJYPE

## АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ НОРМАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В АРХИТЕКТУРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗДАНИЙ ВУЗОВ

Екатерина Игоревна Кочешкова<sup>1</sup>, Николай Васильевич Дубынин<sup>1,2,3</sup>,  
Алексей Владимирович Попов<sup>2</sup>, Владимир Иннокентьевич Коренев<sup>4</sup>,  
Сергей Михайлович Ремарчук<sup>4</sup>, Олеся Александровна Глушенкова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Центральный научно-исследовательский  
и проектно-экспериментальный институт  
промышленных зданий и сооружений (АО «ЦНИИПромзданий»),  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный стро-  
ительный университет, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский гуманитарно-технологический университет –  
Московский архитектурно-строительный институт, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

**Аннотация.** *Актуальность.* В настоящее время особое внимание уделяется развитию современной образовательной среды, и важная роль в этом процессе принадлежит архитектору, создающему материально-пространственную среду для нее. Однако в практике проектирования возникает ряд проблем, связанных с необходимостью исследований архитектуры вузов, реформированием нормативной базы, обеспечением возможности новаторских решений, максимально соответствующих потребностям общества, а иногда и разумно опережающих их.

*Цель.* Разработка положений для внесения изменений в действующий свод правил.

*Результаты.* Рассматривая эти проблемы, существующую ситуацию, выполненные работы, можно сделать выводы о перспективных направлениях в части исследований, нормирования и методической поддержки проектировщиков.

**Ключевые слова:** кампус, университетский городок, студенческий городок, архитектура вузов, архитектурное проектирование, кооперация

**Для цитирования:** Кочешкова Е.И., Дубынин Н.В., Попов А.В., Коренев В.И., Ремарчук С.М., Глушенкова О.А. Анализ и прогноз нормативного регулирования в архитектурном проектировании зданий вузов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 37–49. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-37-49. EDN: BDJYPE

## ORIGINAL ARTICLE

ANALYSIS AND FORECAST OF REGULATORY CONTROL  
FOR ARCHITECTURAL DESIGN AND CREATION  
OF MODERN UNIVERSITIES

Ekaterina I. Kocheshkova<sup>1</sup>, Nikolai V. Dubynin<sup>1,2,3</sup>, Aleksei V. Popov<sup>2</sup>,  
Vladimir I. Korenev<sup>4</sup>, Sergei M. Remarchuk<sup>4</sup>, Olesya A. Glushenkova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Central Research and Design Institute of Industrial Buildings, Moscow, Russia

<sup>2</sup>The National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow University of Humanities and Technology – Moscow Institute  
of Architecture and Construction, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

**Abstract.** Special attention is currently paid to the development of the modern educational environment. The important role in this process belongs to an architect, who creates a material and spatial environment for it. However, in practice, a number of problems arise relating to the need to study the architecture of universities, regulatory control, and innovative solutions that best meet, and sometimes reasonably outstrip, the social needs.

**Purpose:** The purpose of the work is to develop provisions for making changes to the current joint venture.

**Value:** Conclusions are drawn about promising research fields and methodological support for designers.

**Keywords:** university campus, student town, university architecture, architectural design, cooperation

**For citation:** Kocheshkova E.I., Dubynin N.V., Popov A.V., Korenev V.I., Remarchuk S.M., Glushenkova O.A. Analysis and Forecast of Regulatory Control for Architectural Design and Creation of Modern Universities. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 37–49. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-37-49. EDN: BDJYPE

Актуальность темы развития архитектуры вузов определена потребностью в обновлении данных объектов и официальными программами. Министерство науки и высшего образования обозначило перспективу на создание сети объектов современной образовательной среды в национальном проекте «Наука и университеты». Министр науки и высшего образования Российской Федерации утвердил стандарт инновационной образовательной среды 11.05.2023 г. В соответствии с пунктами 1а-4, 1б, 2а, 2б перечня поручений президента (утвержден 15 марта 2024 г. (№ Пр-492)) по вопросу создания сети современной образовательной среды, необходимо продлить этот проект, обеспечить актуализацию критериев отбора проектов в целях повышения качества системы высшего образования и развития академической мобильности обучающихся; создать современную и безопасную инфраструктуру образовательных центров, доступную для граждан, проживающих в соответствующем субъекте Российской Федерации; сформировать благоприятные условия для осуществления предпринимательской деятельности, организации общественных пространств для досуга и от-

дыха граждан, воспитания и развития детей, ведения просветительской деятельности, занятий спортом, предусмотрев включение проектов образовательных организаций высшего образования в мастер-планы развития городов.

Терминология – это первый вопрос, в котором надо разобраться, чтобы понять, что же мы проектируем, кампусы, вузы, образовательную среду. Термин «кампус» на сегодняшний день включает несколько понятий, что вносит некоторую путаницу при его применении. Сейчас оно активно применяется без учета назначения, когда каждый может подразумевать под ним то, что ему кажется правильным. Слово заимствовано из английского языка, но в английский пришло из латинского, где «campus» переводится как «поле, открытое пространство». Анализ справочной литературы показывает следующее: в словаре иностранных слов современного русского языка кампус определяется как территория университета, колледжа или школы, а также университетское общежитие или комплекс общежитий, но возможны и другие варианты. В литературе и исследованиях понятие кампуса обозначают различными определениями, ниже представлены лишь некоторые из них:

- крупный образовательный центр, управляемая, экономически эффективная инновационно-образовательная среда вузов, способствующая формированию конкурентоспособных специалистов при поддержке социальных и промышленных партнеров, наполненная современной материально-технической базой [1];

- комфортная электронно-образовательная среда, предоставляющая разные возможности для студентов – общение, самообразование, доступ к ресурсам интернета и библиотечному фонду, онлайн-семинары и консультации, индивидуальный доступ к компьютерной технике. Необходимые условия формирования электронно-образовательной среды: наличие социальной инфраструктуры, библиотек, оборудованных лабораторий, научных школ под руководством опытных ученых [2];

- комплекс технопарков (исследовательских парков), соединяющий в себе доступность технической базы, возможность обращения к новейшим научным разработкам [3].

Различные определения понятия «кампус» имеют отличающуюся сферу применения (электронно-образовательное пространство вуза, инновационный инфраструктурный комплекс города, региона, место пребывания разных социальных категорий участников и др.), при этом учтены не все варианты раскрытия этого понятия. При архитектурном проектировании применение термина с таким большим количеством значений опасно разночтением документов. В стандарте инновационной образовательной среды определено, что под кампусом подразумевается совокупность функционально связанных объектов недвижимого и движимого имущества, объединенных назначением по комплексному обеспечению образовательной, инновационной, научной, научно-технической деятельности, предназначенных в том числе для проживания и (или) размещения, медицинского обеспечения, отдыха, туризма, занятий физической культурой и спортом, организации питания, культурно-досуговой деятельности и удовлетворения иных потребностей обучающихся, работников одной или нескольких образовательных организаций и (или) научных организаций.

Но почему оказались забыты русские термины, обозначающие объекты, о которых говорится. Ведь в прошлом веке был накоплен большой и ценный

опыт строительства вузов, их комплексов, студенческих городков, наукоградов. В связи с этим надо отметить своевременное распоряжение Правительства РФ от 01.07.2024 № 1734-р во исполнение Указа Президента РФ от 09.10.2022 № 809, в плане мероприятий к которому говорится об отказе использования иностранных терминов при наличии русских. В то же время нельзя не учитывать, что слово «кампус» применяется в международной практике, является коротким и понятным, поэтому в новой редакции СП 278.1325800.2024 «Здания образовательных организаций высшего образования. Правила проектирования» предложен объединенный, который был бы понятен всем, термин и его определение: *«университетский городок (кампус вуза, инновационная образовательная среда) – комплекс функционально связанных зданий и сооружений, необходимых для обеспечения образовательной, научной и научно-технической деятельности одной или нескольких образовательных и (или) научных организаций, в том числе включающих помещения для учебной и научной деятельности, административно-хозяйственных функций, проживания, социального, культурного и бытового обслуживания обучающихся, работников и посетителей»*.

В современных нормативных документах и проектах для российских городов предлагается применять термины, уже приведенные в СП 379.1325800.2020 «Общезжития. Правила проектирования», а также в актуализированном СП 278.1325800.2024 «Здания образовательных организаций высшего образования. Правила проектирования» такие термины, как «студенческий городок», «университетский городок (кампус вуза), (инновационная образовательная среда)», «временные рабочие места (коворкинг)», «университетский технопарк».

Ситуация в области проектирования университетских городков в целом положительная, в настоящее время по федеральному проекту «Создание сети современных кампусов», реализуемому в рамках национального проекта «Наука и университеты», в рамках паспорта рассматривается 17 крупных объектов. На сегодняшний день уже реализовано и реализуется несколько проектов. Например, «Кампус МГТУ имени Н.Э. Баумана» в Москве (рис. 1).

Еще одним интересным примером является «Кампус УрФУ – центр цифровой трансформации» Уральского федерального университета в г. Екатеринбурге, спроектированный архитектурным бюро «Гордеев-Демидов» (рис. 2).

Здание университета формируется из блоков, объединенных общественными пространствами. В каждом блоке предусмотрены атриумы и зоны временной работы (коворкинг), семинарские и лекционные аудитории, лаборатории и компьютерные классы. Проект университета включает конференц-зал на 700 человек, трансформируемые аудитории, помещения для самостоятельной и проектной работы студентов.

В Нижнем Новгороде по проекту «Студии 44» выполнен IT-кампус Неймарк. Главная идея архитекторов – единство общественного пространства, включение в него зон общения студентов разных курсов и преподавателей (рис. 3).

Учитывая проработанный материал, можно отметить, что для современных проектов вузов и университетских городков целесообразно использовать такой объемно-планировочный прием, как объединение различных корпусов многофункциональным пространством общего пользования, в котором расположены общие коммуникационные участки, места внеаудиторной работы, амфитеатры, зоны отдыха, коворкинги, предприятия питания и т. д.



Рис. 1. Кампус МГТУ имени Н.Э. Баумана<sup>1</sup>  
 Fig. 1. Campus of Bauman Moscow State Technical University

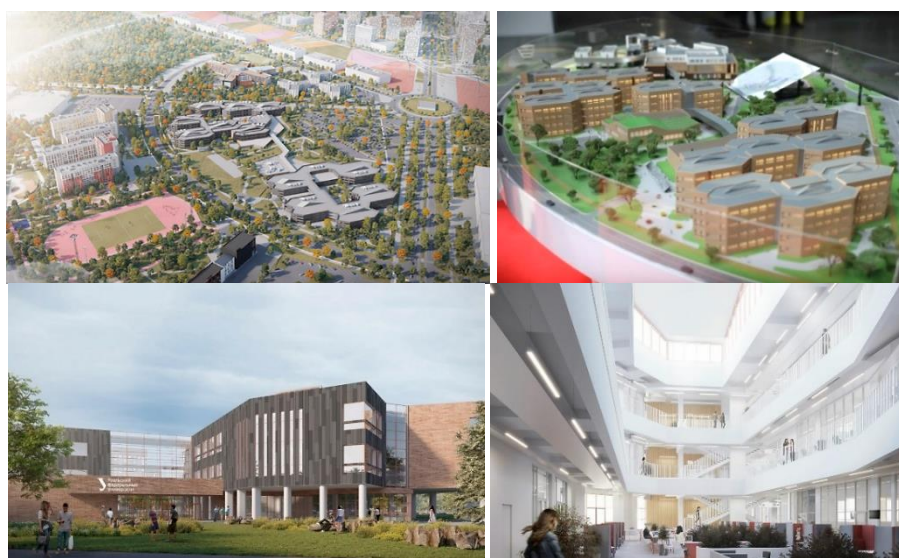


Рис. 2. Кампус Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург<sup>2</sup>  
 Fig. 2. Campus of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

<sup>1</sup> URL: [https://s0.rbk.ru/v6\\_top\\_pics/media/img/6/30/346951133319306.jpeg](https://s0.rbk.ru/v6_top_pics/media/img/6/30/346951133319306.jpeg); <http://mhts.ru/data/ckfiles/images/%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD-02-2024-800.jpg>; <https://stroimsk.ru/novyi-kampus-dlia-baumanki>

<sup>2</sup> URL: <https://www.sinara-group.com/projects/kampus-uralskogo-federalnogo-universiteta/>



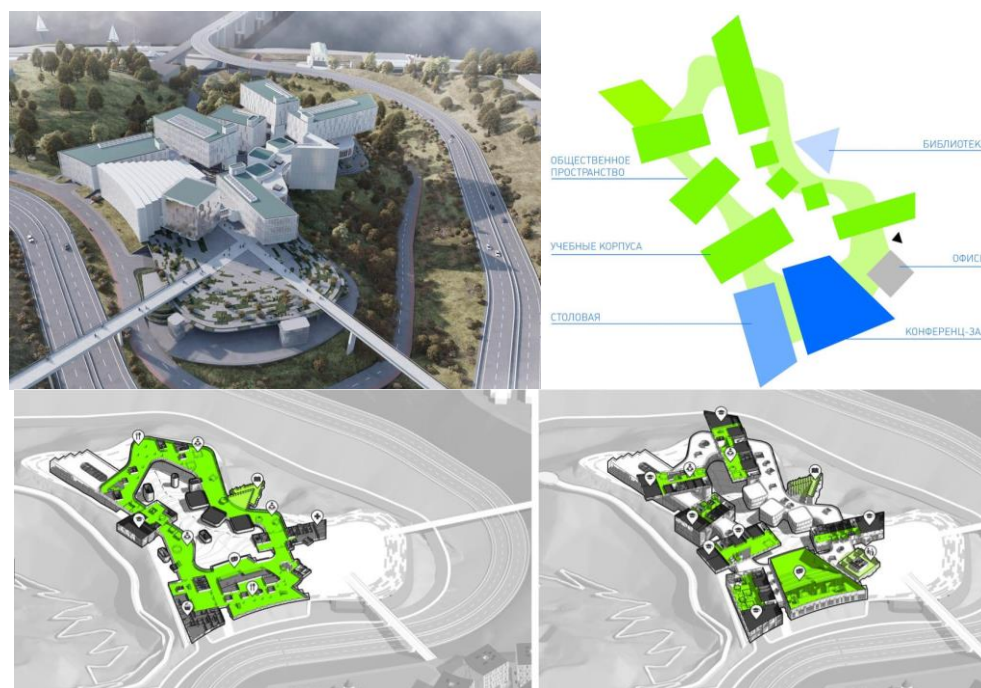


Рис. 3. IT-Кампус Неймарк в Нижнем Новгороде<sup>3</sup>  
Fig. 3. Neymark IT Campus in Nizhny Novgorod

Такой подход планировочными средствами помогает выстраивать новые методики по организации учебного процесса и профессиональной подготовки, нацеленной на получение таких умений и навыков, как коммуникабельность, работа в команде, оперативное усвоение новой информации, генерирование и оформление идей и т. д. В той или иной степени в современных проектах такие пространства часто предусматриваются [4], и представлялось важной задачей сформировать нормативные требования для их проектирования.

Актуализация свода правил СП 278.1325800 «Здания образовательных организаций высшего образования. Правила проектирования», проведенная в 2024 г. АО «ЦНИИПромзданий», стала необходимой по нескольким причинам. Предыдущая версия документа не содержала положений о проектировании университетских кампусов и размещении технопарков на территории вузов. Кроме того, возникла потребность учесть современные требования и исключить устаревшие и избыточные нормы, касающиеся объемно-планировочных и инженерно-технических решений. Эти пробелы и несоответствия создавали сложности на всех этапах проектирования – от разработки концепции до прохождения экспертизы.

В актуализированном документе, кроме уточнения терминологии, рассмотренной выше, включен ряд важных и принципиально новых положений. Рассмотрим некоторые из них.

<sup>3</sup> URL: <https://archi.ru/projects/russia/18590/it-kampus-neimark-v-nizhnem-novgorode-uchastok>

Прежде всего это условия размещения университетских городков на территории города, возможность рассредоточения и необходимость организации транспортных и пешеходных связей, требования к формированию архитектурно-планировочных решений земельных участков университетских городков, в том числе основные функциональные зоны. К ним, как правило, относятся следующие зоны:

- учебная или учебно-научная для размещения зданий кампуса и научных организаций;
- опытно-производственная для размещения технопарка, специализированных полигонов и др.;
- жилая для размещения общежитий и гостиниц, студенческого городка;
- спортивная для размещения спортивных зданий и сооружений; в спортивной зоне предусматривают открытые спортивные площадки и помещения для выдачи спортивного оборудования и инвентаря, пешеходные и велосипедные дорожки на территории, места для хранения средств индивидуальной мобильности (СИМ) обучающихся и сотрудников;
- культурно-досуговая для размещения культурно-досуговых зданий, включая библиотечный комплекс;
- торговая для размещения зданий предприятий торговли и общественного питания и зданий коммунально-бытового назначения, в которых могут быть предусмотрены аптеки, службы быта, услуги полиграфии, пункты выдачи заказов, медицинские центры и стоматологии, салоны красоты и/или парикмахерские, фитнес-клубы и/или спортивные студии, продовольственные магазины, службы проката спортивного инвентаря, отделения банков, книжные и канцелярские магазины, магазины цветов и подарков, оптики, автошколы, химчистки, помещения для групп кратковременного пребывания детей и комнат матери и ребенка;
- медицинская;
- зона для стоянок автомобилей, парковок; резервная для перспективного планирования развития образовательной организации.

Предусмотрена возможность использования многофункциональных зданий. Определены условия размещения и кооперации технопарков и организаций высшего образования. Выделены основные и дополнительные функциональные зоны земельных участков университетских городков.

Уточнены требования к общежитиям и гостиницам для обучающихся и сотрудников, в том числе введена норма общей площади на одно место для проживания или размещения (не менее 20 м<sup>2</sup>), требования к жилым блокам и ячейкам общежитий для семей с детьми.

В инфраструктуре корпусов университетских городков предусмотрена возможность размещения временных рабочих мест (коворкингов), центра общего пользования, компьютерных классов, помещений для промышленных 3D-принтеров и 3D-сканеров, станций числового программного обеспечения, полиграфического центра для широкоформатной печати. Расширен состав предприятий общественного питания и обозначены требования к ним, уточнены вопросы сбора мусора.

Важным дополнением в документе является впервые введенная методика расчета и обоснования состава учебных помещений (аудиторного фонда) зда-

ний организаций высшего образования, в том числе в составе университетских городков, на основании расчетного контингента.

В целом редактированию подверглись практически все пункты, разделы и приложения, размер документа увеличился и дополнился новыми положениями, устаревшие и избыточные требования были актуализированы.

Учитывая опыт исследований ТГАСУ, можно было предложить при дальнейшей актуализации документа более подробно рассмотреть вопросы кооперации вузов. Кооперация вузов представляет собой взаимодействие высших учебных заведений и различных субъектов образовательного, научного и экономического сектора. Данный процесс направлен на достижение синергического эффекта посредством объединения интеллектуальных, материальных и организационных ресурсов участников с целью формирования квалифицированных кадров и стимулирования регионального и национального социально-экономического прогресса.

Формы сетевого взаимодействия в сфере высшего образования различны, начиная от академического обмена между преподавателями и студентами и заканчивая созданием стратегических альянсов и консорциумов.

**Вуз + предприятие.** Партнерства между высшими учебными заведениями и промышленными предприятиями обеспечивают качественное улучшение образовательного процесса, усиливают взаимосвязь теоретической подготовки с практической деятельностью и стимулируют внедрение инновационных решений, что в конечном итоге повышает глобальную научную конкурентоспособность стран.

Наиболее распространенные формы сотрудничества между университетами и промышленными предприятиями включают совместные научно-исследовательские проекты, поддержку предпринимательской деятельности, создание бизнес-инкубаторов, академических стартапов и научных технопарков [5].

Примером межвузовской кооперации с привлечением индустриальных партнеров можно назвать проект Solution Lab, реализованный в период с 2015 по 2016 г., который представляет собой инновационную модель интеграции академической среды и промышленных партнеров, инициированную университетом ИТМО и СПбПУ [6].

**Вуз + вуз.** Кооперация между высшими учебными заведениями представляет собой стратегическое партнерство двух или более университетов для достижения согласованных целей в сфере высшего образования, научно-исследовательской деятельности и внедрения инновационных технологий [7]. Ключевые направления данной кооперации включают следующие аспекты:

1. Разработка совместных образовательных программ и коллаборация в научной сфере: реализация программ двойных дипломов, предоставляющих возможность студентам получить квалификационные степени одновременно в обеих участвующих организациях, совместная организация научно-исследовательских проектов, публикация результатов коллективной работы, а также активное участие в международных научных форумах и симпозиумах.

2. Формирование консорциумов: создание альянсов вузов для совместного участия в масштабных исследовательских инициативах, конкурсах на получение грантов и тендеров.



3. Территориальное объединение в кампусную систему, а также интеграция инфраструктурных ресурсов: совместное использование лабораторных комплексов, библиотечных коллекций, вычислительных центров и учебно-научного оборудования.

Одним из примеров вузовской кооперации является проект «Большой университет Томска» (БУТ). Основной целью данного партнерства является усиление академического потенциала указанных университетов в области образовательной деятельности, научно-исследовательских работ и инновационного развития через интеграцию их ресурсной базы и профессиональных компетенций.

Ключевым элементом практической реализации проекта выступает формирование объединенного кампуса, предназначенного для оптимизации учебных процессов и интенсификации научной кооперации среди студентов, профессорско-преподавательского состава и исследователей каждого из участвующих вузов. Данная инфраструктура обеспечит благоприятную среду для эффективного обмена знаниями и стимулирования инновационных инициатив (рис. 4).



Рис. 4. Архитектурная концепция межвузовского кампуса в г. Томске<sup>4</sup>  
Fig. 4. Architectural concept of the interuniversity campus in Tomsk

**Вуз + город.** Кооперация представляет собой интенсивное взаимодействие между высшими учебными заведениями и муниципальными органами власти, ориентированное на решение образовательных и социально-экономических задач городского сообщества. Данное сотрудничество охватывает ряд ключевых направлений. Прежде всего, университеты активно участвуют в разработке и внедрении проектов, направленных на улучшение городской инфраструктуры, включая строительство новых объектов, модернизацию транспортных систем и иных компонентов городской среды. Помимо этого, учебные заведения занимаются исследовательской деятельностью, изучая актуальные проблемы городского развития, включая экологические аспекты, демографические тенденции, экономические показатели и урбанистику, предлагая научно обоснованные решения выявленных проблем. И наконец, совместная деятельность вузов и муниципальных властей направлена на создание инновационных центров, технологических парков и хабов для стартапов, что стимулирует экономический рост и привлечение инвестиций [8].

<sup>4</sup> Материалы ООО Градостроительный институт пространственного моделирования и развития «Мирпроект».

Примером успешного взаимодействия является совместный проект Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и правительства Москвы, результатом которого стало создание инновационного кластера «Сколково». Университет сыграл ключевую роль в инициировании процессов модернизации и социальных преобразований в городе (рис. 5).

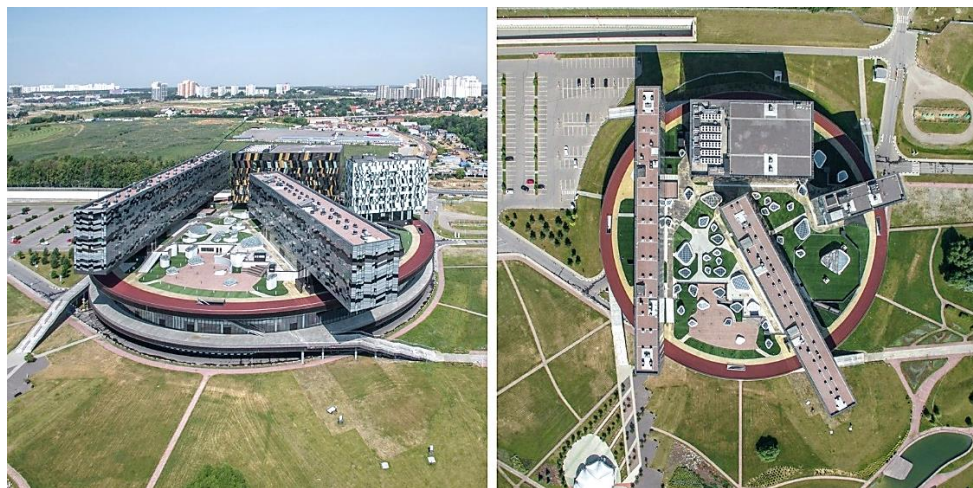


Рис. 5. Школа управления «Сколково» в г. Москве<sup>5</sup>

Fig. 5. Skolkovo School of Management in Moscow

Перечисленные выше виды коопераций вузов с различными структурами позволяют объединять не только интеллектуальные, организационные, административные ресурсы, но и материальные: вуз + предприятие – создание бизнес-инкубаторов, научных технопарков; вуз + вуз – объединение учебно-научной, лабораторной, жилой или спортивной инфраструктур высших учебных заведений, создание межвузовских центров; вуз + город – создание инновационных научно-технологических центров; объединение городских ресурсов и университетов для совместного использования площадок.

Для большинства российских городов, в том числе и Томска, характерна рассредоточенная инфраструктура кампусов вузов в городской среде. Университеты, расположенные в городской инфраструктуре, играют ключевую роль в развитии инновационной сферы и формировании «креативного класса». В данной ситуации кооперирование материальной инфраструктуры для совместных целей и создание различных центров и технопарков представляет собой уникальную платформу для эффективного использования ресурсов, обмена знаниями и технологиями. СП 278.1325800 распространяется на проектирование не только строящихся, но и реконструируемых зданий образовательных организаций высшего образования и университетских городков. Следовательно, в городах, где невозможно строительство отдельного кампуса, различные кооперации позволяют вузам развиваться в условиях глобальной конкуренции и реагировать на вызовы современности.

<sup>5</sup> URL: <https://dzen.ru/a/XL3X7YjaHgC1YImk>

В дальнейшем, работая в данной области, особое внимание следовало бы обратить на востребованность методических рекомендаций по проектированию университетских городков и зданий вузов. На сегодняшний день заказчик, составляя техническое задание на проектирование, видит отдельные проблемы не комплексно, а проектировщик и эксперты могут использовать только свой опыт, который не обобщен. Проект университетского городка – работа длительная, многосложная, вызывающая споры с заказчиком и не всегда выгодная для проектировщиков. Экспертиза проектов проводится достаточно долго. Причина – большое количество спорных вопросов при недостаточности нормативных документов. Актуальные документы, пособия, методические рекомендации, основанные на современном опыте и НИР, позволят облегчить работу и сократить время проектирования и экспертизы проектов, защитить проектировщика от неправомерных требований заказчика и экспертизы, а заказчика и конечного пользователя – от небезопасных решений проектировщика, помочь экспертизе, защитить все стороны от потребительского экстремизма.

### Выводы

На сегодняшний день выполнена большая работа по актуализации документа, положительный эффект которой мы увидим в ближайшее время, в том числе в возможности развития архитектуры зданий вузов и университетских городков, а также в решении многих спорных, в том числе формальных, вопросов при их проектировании.

Но данная работа должна продолжаться, чтобы обеспечить постоянное внедрение новых перспективных архитектурных и технических решений. Во-первых, нормативный документ не может долго оставаться без актуализации, т. к. это тормозит процесс инноваций в проектировании. Во-вторых, совершенно очевидна необходимость в разработке таких новых документов, как методические пособия по проектированию университетских городков, создание каталогов лучших и типовых проверенных решений. Это требует разработки НИР, которые в настоящее время полностью отсутствуют в данной области. Возможности оперативно решить эти вопросы в части выполнения работы увеличиваются при объединении усилий научных творческих коллективов как научно-исследовательских институтов, так и вузов России при поддержке государственного регулятора и необходимом финансировании.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Тенчурина Х.Ш.* Становление и развитие профессионально-педагогического образования, последняя треть XIX – начало 90-х гг. XX в. : специальность 13.00.01 «Общая педагогика, история педагогики и образования» : диссертация на соискание ученой степени доктора педагогических наук / Тенчурина Халида Шакеровна. Москва, 2002. 562 с.
2. *Барчукова И.С.* Кампус как комфортная электронно-образовательная среда // Спортивно-педагогическое образование : сетевое издание. 2018. № 4. С. 43–47. END: YVPYJF
3. *Неборский Е.В.* Формы осуществления интеграции образования, науки и производства в университетах США и Японии : специальность 13.00.01 «Общая педагогика, история педагогики и образования» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата педагогических наук / Неборский Егор Валентинович. Москва, 2011. 23 с.
4. *Попов А.В.* Архитектура вузов (история, современное состояние, особенности проектирования) : монография. Москва : ИНФРА-М, 2024. 492 с. ISBN 978-5-16-112427-7.

5. Салми Д. Ошибки стратегии создания университетов мирового класса // Экономика образования. 2011. № 3 (64). С. 107–109. END: OCQLTH
6. Миронова Д.Ю., Киселева П.С., Баранов И.В. Кооперация вузов и предприятий в контексте новых вызовов современного инженерного образования // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2023. Т. 21. № 1. С. 60–70. DOI: 10.24147/1812-3988.2023.21(1).60-70
7. Белов С.А., Линская Ю.В., Кропачев Н.М. Единство системы государственных вузов в современной России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2020. Т. 19. № 2. С. 151–163. END: VPWUXJ
8. Университетские кампусы и город: кооперация ради конкурентоспособности // Кириллица : [сайт]. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/3f0/kbpm276p3tau6knlzdl3d6ozz0fve0e.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).

## REFERENCES

1. Tenchurina H.S. “Formation and development of vocational pedagogical education late in the 19th and early 20th centuries”. DSc Thesis. Moscow, 2002. 562 p. (In Russian)
2. Barchukova I.S. Campus as a Comfortable Electronic Educational Environment. *Sportivno-pedagogicheskoe obrazovanie*. 2018; (4): 43–47. END: YVPYJF (In Russian)
3. Neborsky E.V. “Integration of education, science and production at universities in the USA and Japan”. PhD Abstract. Moscow, 2011. 23 p. (In Russian)
4. Popov A.V. Architecture of Universities (history, Current State, Design). Moscow: INFRA-M, 2024, 492 p. (In Russian)
5. Salmi D. Mistakes in Strategy of Creating World-Class Universities. *Ekonomika obrazovaniya*. 2011; 3(64): 107–109. END: OCQLTH (In Russian)
6. Mironova D.Yu., Kiseleva P.S., Baranov I.V. Cooperation of Universities and Enterprises in the Context of New Challenges of Modern Engineering Education. *Vestnik Omskogo universiteta. Ser. Ekonomika*. 2023; 21 (1): 60–70. DOI: 10.24147/1812-3988.2023.21(1).60-70 (In Russian)
7. Belov S.A., Linskaya Yu.V., Kropachev N.M. The Unity of State Universities in Modern Russia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment*. 2020; 19 (2): 151–163. END: VPWUXJ (In Russian)
8. University campuses and the city: cooperation for the sake of competitiveness. Report – 2021. Available: [www.csr.ru/upload/iblock/3f0/kbpm276p3tau6knlzdl3d6ozz0fve0e.pdf](http://www.csr.ru/upload/iblock/3f0/kbpm276p3tau6knlzdl3d6ozz0fve0e.pdf) (accessed March 20, 2025). (In Russian)

## Сведения об авторах

Кочешкова Екатерина Игоревна, канд. архитектуры, ст. научный сотрудник, АО «ЦНИИПромзданий», 127238, г. Москва, ш. Дмитровское, 46, arch-kei@mail.ru

Дубынин Николай Васильевич, канд. архитектуры, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; начальник отдела, АО «ЦНИИПромзданий», 127238, г. Москва, ш. Дмитровское, 46, archresearch@mail.ru

Попов Алексей Владимирович, докт. архитектуры, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, da945@yandex.ru

Корнев Владимир Иннокентьевич, канд. архитектуры, почетный архитектор РФ, советник РААСН, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vik.tomsk@rambler.ru

Ремарчук Сергей Михайлович, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, greyremarchuk@gmail.com

Глушенкова Олеся Александровна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ol.glushenkova@mail.ru

**Authors Details**

*Ekaterina I. Kocheshkova*, PhD, Senior Research Assistant, Central Research and Design Institute of Industrial Buildings, 46, Dmitrovskoe Ave., 127238, Moscow, Russia, arch-kei@mail.ru

*Nikolai V. Dubynin*, PhD, A/Professor, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia; Central Research and Design Institute of Industrial Buildings, 46, Dmitrovskoe Ave., 127238, Moscow, Russia, Moscow University of Humanities and Technology – Moscow Institute of Architecture and Construction, 32, Volgogradsky Ave., Build. 11, 109316, Moscow, Russia, da945@yandex.ru

*Aleksei V. Popov*, DSc, Professor, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, da945@yandex.ru

*Vladimir I. Korenev*, PhD, Honored Architect of the Russian Federation, RAACS Advisor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vik.tomsk@rambler.ru

*Sergei M. Remarchuk*, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, greyremarchuk@gmail.com

*Olesya A. Glushenkova*, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ol.glushenkova@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 06.05.2025  
Одобрена после рецензирования 22.05.2025  
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 06.05.2025  
Approved after review 22.05.2025  
Accepted for publication 26.06.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 50–63.

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 (5): 50–63.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727.15

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-50-63

EDN: CPVXCP

# ФОРМИРОВАНИЕ КУЛЬТУРНОГО ЦЕНТРА ДЛЯ ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Ксения Дмитриевна Шевченко**

*Академия архитектуры и искусств*

*Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Аннотация.** Актуальность изучения и формирования культурного центра для Южного федерального университета (ЮФУ) обусловлена необходимостью организации творческой деятельности студентов. Южный федеральный университет является крупным научно-образовательным центром России. Располагается в двух городах, имеет большое количество учебных корпусов по факультетам обучения и насчитывает более 30 тыс. студентов. Такому серьезному учебному заведению необходимо иметь собственный культурный центр. Главная задача культурного центра ЮФУ – создать среду, где академические знания пересекаются с творческими. Культурный центр становится полигоном, где тестируется будущее – взаимодействие человека и машины (ИИ). Обществу особенно нужны специалисты с высоким уровнем творческой активности; культурный центр в университете сыграет ключевую роль в ее формировании, создаст среду для развития креативного мышления и широты взглядов.

**Цель.** Разработка проекта культурного центра для реализации и проведения мероприятий университета ЮФУ с уклоном на конкретные задачи учебного заведения.

**Методика.** Исследование опирается на изучение международного опыта проектирования культурных центров и проводится по трем основным направлениям: градостроительному, функциональному и объемно-планировочному.

**Результаты исследования.** Проектируемый объем здания гармонично вписывается в структуру квартала: со стороны ул. Большой Садовой поддержана композиция исторической застройки, а со стороны ул. Суворова учтены нормы инсоляции и определена допустимая высотность. Главной идеей решения стал атриум-галерея, проходящий через все здание. Культурный центр отличается современными, многофункциональными планировками.

**Ключевые слова:** культурный центр, студенты, университет, творчество, многофункциональность, адаптивность

**Для цитирования:** Шевченко К.Д. Формирование культурного центра для Южного федерального университета // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 50–63. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-50-63. EDN: CPVXCP

ORIGINAL ARTICLE

## CULTURAL CENTER FOR SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY

Kseniya D. Shevchenko

*The Academy of Architecture and Arts, Southern Federal University,  
Rostov-on-Don, Russia*

**Abstract.** The relevance of the cultural center for Southern Federal University is determined by the need to organize students' creative activities. Southern Federal University is a major scientific and educational center of Russia. Geographically, it locates in two cities, has a large number of academic buildings for different faculties, and enrolls more than 30,000 students. Such a significant educational institution requires its own cultural center.

The main task of this Cultural Center is to create an environment where academic knowledge intersects with creativity. The cultural center becomes a testing ground for the future: the interaction between humans and machines. The society needs specialists with a high level of creative activity, and the cultural center plays a key role in fostering it, creating an environment for the development of creative thinking and broad perspectives.

**Purpose:** Development of a cultural center project for the implementation and organization of SFedU events, with a focus on the specific tasks of the university.

**Methodology:** The study of international experience in cultural center design in three main areas: urban planning, functional, and spatial-planning.

**Research findings:** The designed building volume fits harmoniously the structure of the block: in Bolshaya Sadovaya Street, the composition of the historical development is preserved, while in Suvorova Street, insolation standards are taken into account and the permissible height is determined. The design is characterized by an atrium-gallery running through the entire building. The cultural center is distinguished by modern, multifunctional planning solutions.

**Keywords:** children with disabilities, mental characteristics, adaptation, education, upbringing, socialization

**For citation:** Shevchenko K.D. Cultural Center for Southern Federal University. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 50–63. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-50-63. EDN: CPVXCP

Первые культурные центры зарождались в виде курганов, менгиров, дольменов и кромлехов – архитектурных форм, связанных с религиозными культами первобытного общества. В государствах Древнего Востока, таких как Междуречье и Египет, храмовые комплексы стали центрами духовной, культурной и общественной жизни.

В античную эпоху культура выходит за пределы религиозных пространств и обретает городскую форму. В Афинах, например, Акрополь, агора и Ареопаг образовывали единую систему, служившую административным и культурным ядром. В Древнем Риме схожую роль выполняли форумы – центральные общественные пространства, размещенные на пересечении городских дорог.

В Средние века христианские монастыри стали оплотом духовной и культурной жизни. Одновременно в городах формировалась новая светская культура. Особое значение приобрели профессиональные объединения – гильдии и цеха.

Эпоха Возрождения дала начало первым клубам в Англии – неформальным собраниям друзей в тавернах. К концу XIX в. в Европе и России возник



новый тип культурного учреждения – народный дом. После Революции 1917 г. в России началось формирование собственной модели клубов.

В 1920-е гг. разрабатывался принципиально новый тип архитектуры для пролетарских клубов – дворцы труда и культуры, совмещающие театральные залы, кружковые помещения и клубные пространства. В 1930–50-е гг. была разработана единая концепция клубного здания, зафиксированная в «Положении о профсоюзном клубе» (1939). Тогда сложился образ клуба как парадного, светлого и открытого пространства. Архитекторы К.С. Мельников и И.А. Голосов предложили выразительные экспериментальные решения.

В послевоенный период до середины 1980-х гг. клубы стали частью городского планирования: они строились в жилых районах, микрорайонах и городских центрах, включали универсальные залы и дома культуры [3].

Южный федеральный университет является одним из крупных образовательных учреждений Российской Федерации. Это заведение выпускает высококвалифицированных специалистов. Проблема отсутствия комплекса для осуществления культурного развития студентов здесь стоит довольно остро. Университет имеет учебные корпуса в двух городах: в Ростове-на-Дону и Таганроге. Каждый год в нем проходит большое количество мероприятий, которые часто проводятся в городских ДК на арендной основе.

Появление культурного центра в образовательной среде университета ЮФУ является необходимостью. Университет – это место, где человек способен развить в себе различные навыки, помимо академических знаний. В культурных центрах высших учебных заведений проводятся мероприятия, способные раскрыть творческий потенциал личности: концерты, выставки, мастер-классы, вокальные классы, конференции. В такой среде студенты могут получить опыт организационной деятельности, улучшить коммуникативные навыки и развить лидерские качества. Кроме того, строительство культурного центра способствует укреплению общественного статуса университета. Взаимодействие центра с представителями культурных сообществ, бизнесменами и предпринимателями способно укрепить связи с внешней средой, что может помочь студентам получить необходимый опыт в начале карьеры.

Архитектурное проектирование культурных центров при университетах требует учета нескольких ключевых принципов. Прежде всего, это многофункциональность: современные культурно-просветительские центры отличаются многофункциональностью и гибкостью своих пространств. Они предназначены для размещения различных видов деятельности, таких как выставки, лекции, семинары, концерты и общественные мероприятия. Модульные конструкции и трансформируемые элементы позволяют легко адаптировать помещения под конкретные нужды и создавать динамичные и многофункциональные пространства [6].

Второй важный аспект – интеграция в городскую среду. Культурно-просветительские центры все чаще проектируются с учетом особенностей местного контекста и потребностей общества. Анализ подходов к формированию культурных комплексов в исторической городской среде позволил выделить три основные концепции: синтетическое взаимодействие с окружающей средой, основанное на сохранении исторических форм и принципов организации пространства;

внедрение сооружений в контекст места с использованием нейтральных архитектурных решений; контрастное выделение новых объектов в городском окружении, подчеркивающее их современность и уникальность [5].

Третьим направлением становится устойчивость и экологичность. В процессе проектирования применяются экологически чистые материалы и технологии, а также внедряются системы энергосбережения и использования возобновляемых источников энергии. Зеленые крыши, системы сбора дождевой воды и естественная вентиляция способствуют минимизации воздействия зданий на окружающую среду и созданию комфортных условий внутри помещений [2].

Неотъемлемой частью проектирования культурных пространств становятся цифровые технологии и инновации. Интерактивные экспонаты, виртуальная и дополненная реальность, а также мобильные приложения открывают новые возможности для обучения и взаимодействия с посетителями. Технологии помогают создавать персонализированный опыт, обеспечивать доступ к цифровым ресурсам и улучшать общую атмосферу в центре [Там же].

Также большое значение в поднимаемом вопросе имеет персонализация и инклюзивность. Современная архитектура культурно-просветительских центров ориентирована на персонализацию и инклюзивность. Пространства адаптируются к различным потребностям посетителей, включая людей с ограниченными возможностями и представителей разных культурных и социальных групп [Там же].

На основе обобщения опыта проектирования можно выделить, что внутреннее пространство представляет собой синтез зон для различных функциональных процессов, таких как выставки, концерты, театральные постановки, образовательные мероприятия, научно-исследовательская деятельность и творческий процесс. Культурный центр нового типа – это пространство, которое способно трансформироваться и видоизменяться в зависимости от запросов потребителей.

В ходе исследования был проведен анализ подобных культурных центров при университетах и образовательных учреждениях. Одним из них является «**Центр Культур НИУ ВШЭ**» на Покровском бульваре, 11, в Москве. Университет Высшая школа экономики создан в 1992 г. и в настоящее время размещается в 26 зданиях Москвы. Учебная и исследовательская работа проводится преимущественно в трех учебных кампусах: на Покровском бульваре, 11 (рис. 1), на Мясницкой улице, 20, и на Кирпичной, 33/5.

В 2019 г. здание на Покровском бульваре было введено в эксплуатацию для обучения. Новое здание представляет собой синтез учебной и культурной деятельности. Композиция комплекса состоит из 13 зданий и трех атриумов. Согласно концепции, освободившиеся места были превращены в дворы-атриумы. Южный атриум – центр сосредоточения учебных аудиторий, центральный атриум окружен преимущественно подразделениями администрации и кабинетами для научных исследований. Северный атриум охвачен теми же функциями, а также внутри него – многоярусный эллипс библиотеки с просторным залом студенческой столовой в наземном этаже. В здании-пластине сохранились череда кабинетов и многоэтажный коридор, переходящий в культурный центр [4].

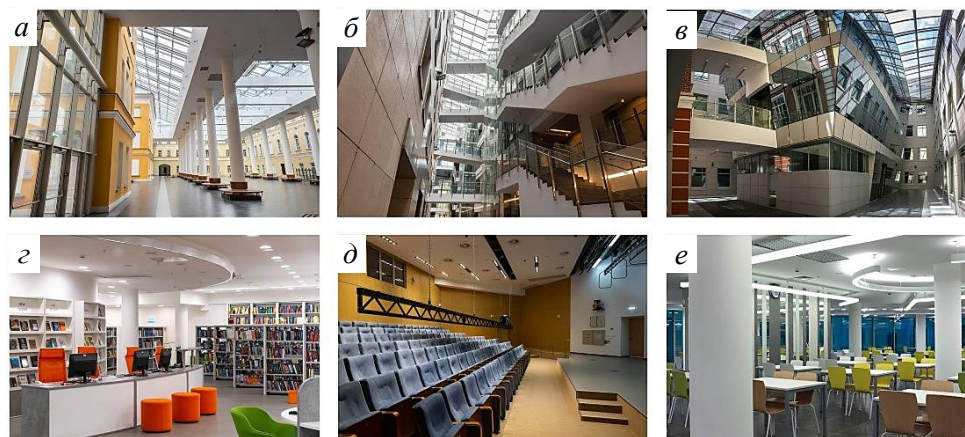


Рис. 1. НИУ ВШЭ на Покровском бульваре, 11:

*a* – главный атриум; *б* – северный атриум; *в* – южный атриум; *г* – библиотека; *д* – конференц-зал; *е* – столовая

Fig. 1. HSE University on Pokrovsky Boulevard, Building 11:

*a* – main atrium; *b* – northern atrium; *c* – southern atrium; *d* – library; *e* – conference hall; *f* – canteen

В комплексе Покровки есть все не только для комфортной работы, но и для проведения внеучебного времени: студенческие коворкинги, 3 кафе, профессорские клубы и ресторан. В культурном центре обновлены два конференц-зала и пространства для внеучебной активности студентов.

Такое здание включает в себя как образовательную функцию, так и культурную составляющую. Пространство плавно переходят от зон для занятий и лекций к площадкам для творчества и отдыха. Функциональное зонирование позволяет студентам гармонично сочетать учебный процесс с культурной активностью. Переходные галереи и атриумы формируют целостную архитектурную среду, способствующую непрерывной коммуникации. Преимуществами данного сценария является то, что студент способен плавно переключаться между разными видами активностей и развивать свои навыки в интересующих его направлениях посредством посещения мероприятий культурного центра, библиотеки, клубов по интересам.

В качестве еще одного примера был рассмотрен образовательный центр **Сколковский институт науки и технологий** (рис. 2) в Москве, спроектированный архитектурным бюро Herzog & de Meuron. Первоначальный план по разработке кампуса Сколково состоял в создании качественной городской среды, которая сочетает в себе разные сферы жизни человека: учебу, работу, путешествия, шопинг, отдых.

Herzog & de Meuron разрабатывали проект 3-го округа с университетом. Он состоит из трех частей, или трех окружностей: Восточное Кольцо, Агора и Западное Кольцо. Внешнее кольцо диаметром 280 м включает два меньших кольца. В нем размещаются образовательные и общественные помещения, в том числе факультеты, административные здания и места для совещаний. Внутреннее кольцо включает учебные кабинеты и аудитории. В центре, на пересечении этих двух колец, находится главная аудитория.



Рис. 2. Сколковский институт науки и технологий:

*a* – фасад комплекса; *б* – интерьер входной группы; *в* – внутренний двор; *г* – главный вход; *д* – общий вид; *е* – интерьер атриума

Fig. 2. Institute of Science and Technology in Skolkovo:

*a* – facade; *b* – entrance; *c* – inner courtyard; *d* – main entrance; *e* – general view; *f* – interior of the atrium

Строительство такого комплекса в Москве было оправданным шагом в развитии молодежи города. Столица России – один из передовых городов Европы, и для этого мегаполиса с большим количеством талантливых молодых людей крайне важно иметь пространство, которое бы сочетало образовательную и практическую деятельность, а также культурные мероприятия.

Проектирование таких центров, которые совмещают в себе учебную и культурную функцию, очень актуально в настоящее время. Наша страна находится в условиях постиндустриального общества, где культура играет важную роль и является частью непрерывного процесса обучения. За рубежом культурный центр при университете и даже в одном здании – это не редкость.

Примером зарубежного культурного центра при высшем учебном заведении может послужить **The New School University Center** (рис. 3) от архитектурного бюро Skidmore, Owings & Merrill. The New School находится в Нью-Йорке, в нем обучается более 10 000 студентов. Учебное заведение имеет несколько кампусов, расположенных от Financial District (Финансового района) до Upper West Side (Верхнего Вест-Сайда).

The New School University Center для большого учебного заведения является важным связующим объектом, в котором располагаются междисциплинарные пространства. Этот 16-этажный центр вмещает дизайн-студии, лаборатории, мастер-классы, библиотеку, общежитие, конференц-зал, кафе и гибкие общественные пространства для студенческой деятельности. Вертикальные, горизонтальные и диагональные пути движения состоят из различных лестниц и переходов, которые соединены рекреационными квадратными площадками, где могут пообщаться студенты и преподаватели. Университетский центр спроектирован в соответствии с сертификатом LEED Gold (Руководство по энергоэффективному и экологическому проектированию США) [1].



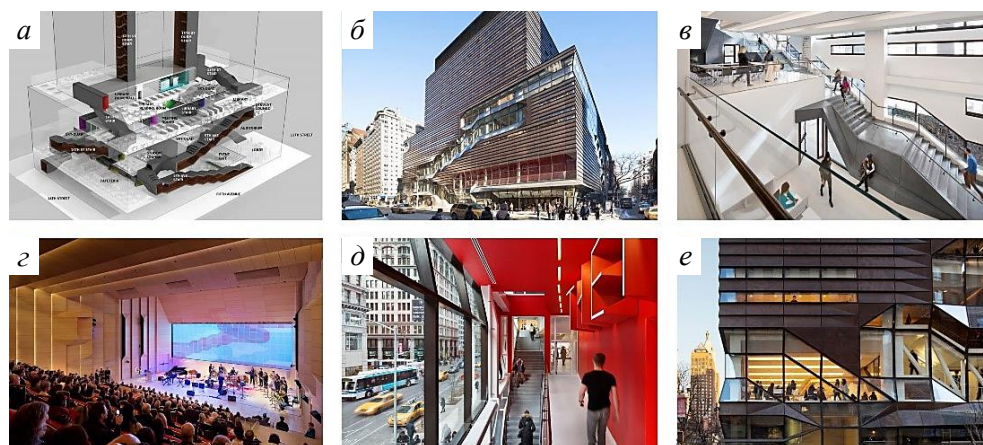


Рис. 3. The New School University Center, New York:

*a* – 3D-схема кампуса; *б* – фасад здания; *в* – рекреационные пространства холла; *г* – концертный холл; *д* – коридоры; *е* – детали фасада

Fig. 3. The New School University Center in New York:

*a* – 3D diagram of the campus; *b* – facade; *c* – recreational spaces of the hall; *d* – concert hall; *e* – corridors; *f* – facade details

Данный проект соответствует характеристикам культурного центра и является основным местом осуществления творческой деятельности студентов вуза. Он расположен в отдельном здании, рядом с основными учебными корпусами, что делает его связующим звеном между различными факультетами университета.

Еще одним примером университетского кампуса с общественной и культурной функцией может служить кампус **Икэбукуро Международного университета Токио** (Tokyo International University Ikebukuro Campus), расположенный в районе Тосима, Токио, Япония (рис. 4).

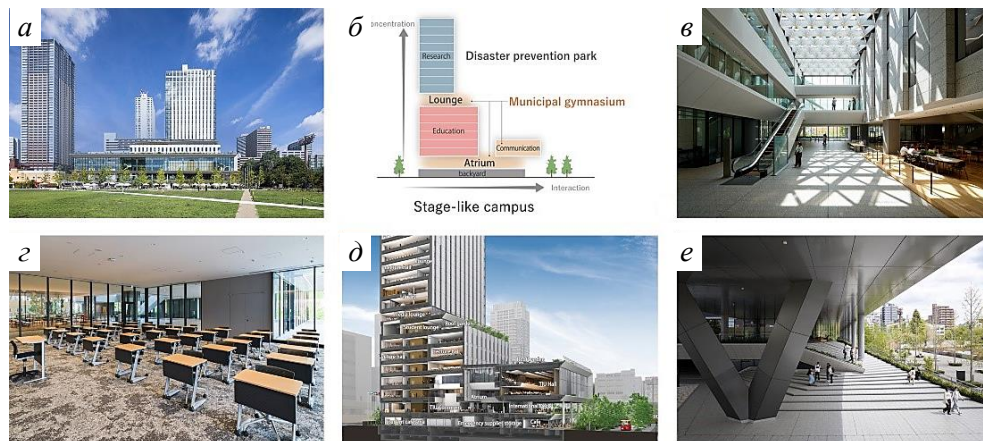


Рис. 4. Кампус Токийского международного университета в Икебукуро, Тосима, Япония:

*a* – общий вид; *б* – разрез; *в* – атриум; *г* – классы; *д* – 3D-разрез; *е* – входная группа

Fig. 4. Tokyo International University Ikebukuro Campus, Toshima, Japan:

*a* – general view; *b* – schematic view; *c* – atrium; *d* – classrooms; *e* – 3D section; *f* – entrance

На втором этаже здания размещена зона для общения и совместной работы студентов (коворкинг), где проходят мастер-классы и заседания клубов по интересам. Здесь также находится просторный атриум. Через него можно попасть в концертный зал, поднявшись на эскалаторе. Выше расположены лекционные залы и аудитории. На восьмом этаже находится зона отдыха для студентов с выходом на озеленённые балконы. Девятый этаж занимает медиазона, а десятый и одиннадцатый этажи отведены под большую библиотеку.

В этом проекте архитекторам удалось создать функциональное и комфортное пространство, где учебный процесс органично сочетается с культурной и досуговой деятельностью. Здание включает все необходимые зоны для творческого, академического и личностного развития студентов.

Таким образом, зарубежные примеры демонстрируют, как культурные центры при университетах становятся пространствами всестороннего развития студентов, объединяя учебную, творческую и общественную активность. Этот опыт стал основой для формирования концепции культурного центра Южного федерального университета.

При проектировании культурного центра для ЮФУ был проведен опрос, который определил необходимость создания такого пространства. С помощью опроса студентов, учебного совета и работы с администрацией ЮФУ была составлена предварительная программа культурного центра, которая после доработки и уточнения легла в основу состава и площадей помещений проектируемого КЦ ЮФУ.

Было выявлено, что университету необходимо пространство зрительного зала, где будут проходить важнейшие мероприятия, такие как «Студенческая весна», конференции различного типа, концерты и награждения, театральные постановки. Для осуществления внеучебной творческой деятельности студентов по подготовке к различным событиям необходимо также предусмотреть наличие трансформируемых пространств для репетиций и мастер-классов, зал хорового пения, студию звукозаписи, залы танцевальных репетиций. В соответствии с разработанной программой будет запроектировано несколько трансформируемых конференц-залов с мобильными перегородками для различной деятельности.

Рекреационные зоны также проектируются как многофункциональные пространства – это не только места для отдыха и общения студентов и преподавателей, но и площадки для выставок и массовых мероприятий. Из этого анализа следует, что все помещения должны отвечать принципу **гибкости и универсальности**: классы и залы смогут использоваться разными группами для разнообразных целей.

Проект культурного центра для ЮФУ (рис. 5) также совмещает в себе учебную функцию и культурную составляющую. Поскольку участок проектирования располагается по соседству с главным университетским корпусом, который находится по адресу: ул. Большая Садовая, 105, было принято решение объединить историческое здание с новым. На первом этаже университета будет осуществляться тёплый переход в культурный центр, благодаря чему достигается эффект перетекающего пространства из учебного в творческое.

Северное дворовое пространство существующего исторического здания университета будет объединено с новым пространством проектируемого куль-

турного центра в единую рекреационную зону. Таким образом, достигается образование прогулочной территории для студентов, преподавателей, администрации, посетителей главного здания и проектируемого культурного центра ЮФУ. На данный момент задний двор не предназначен для прогулки, но в новом проекте эта функция предусмотрена, и это является важным преимуществом. Выполняется принцип проектирования – **устойчивость и экологичность**.



Рис. 5. Культурный центр ЮФУ:

*a* – переходная галерея, интерьер; *б* – фасад с ул. Большой Садовой; *в* – интерьер со стороны главного входа; *г* – фасад с ул. Суворова; *д* – общая композиция комплекса; *е* – прогулочная зона внутреннего двора

Fig. 5. SFedU Cultural Center:

*a* – transition gallery interior; *b* – facade from Bolshaya Sadovaya Street; *c* – the main entrance; *d* – facade from Suvorova Street; *e* – general composition; *f* – inner courtyard

С точки зрения **интеграции в городскую среду** на рис. 5 можно увидеть композицию здания культурного центра в соотношении с контекстом окружающей застройки. Новое здание гармонично вписывается в участок проектирования, образует хорошую инсоляцию для соседнего жилого дома и школы напротив северного фасада по ул. Суворова. Здание является акцентным, т. к. имеет протяженную стеклянную галерею, которая переходит в атриум и на главный фасад по ул. Большой Садовой. Южный фасад проектируемого культурного центра фланкируется: с восточной стороны конструктивистским домом, а с южной – историческим зданием главного корпуса ЮФУ по адресу: ул. Большая Садовая, 105.

Сложная задача – объединение в гармоничную композицию разных по стилю зданий с проектируемым объемом культурного центра – была решена с помощью построения сеток существующих фасадов, выявления и использования в проектируемом здании их ритмов и акцентных частей.

Проектируемая связь по первому этажу с историческим зданием главного корпуса обеспечит попадание посетителей в существующий научно-образовательный центр «Музей истории ЮФУ», расположенный в западной части первого этажа исторического здания. Здесь собраны редкие архивные документы,



экспонаты из разных эпох жизни университета и современное мультимедийное оборудование, в том числе панорамная комната, с помощью которой можно отправиться в виртуальную экскурсию по вузу. Это значительно усилит культурную составляющую общей концепции. Таким образом, можно сделать вывод, что идея объединения двух зданий является логичным и разумным решением.

Функционирование культурного центра ЮФУ будет осуществляться с использованием **цифровых технологий и инноваций**. Планируется оснащение помещений современным оборудованием: конференц-залов, аудиторий для мастер-классов, компьютерного класса, библиотеки. Также предполагается разработка мобильного приложения «Культура ЮФУ», в котором студенты смогут записываться на мероприятия, получать актуальное расписание и быть в курсе всех событий, тем самым вовлекаясь в культурную жизнь университета.

Пространство культурного центра должно быть общедоступным и отвечать принципам **персонализации и инклюзивности**. Проектные решения обязаны обеспечивать доступность для маломобильных групп населения (МГН) как внутри здания, так и на прилегающей территории, включая земельный участок и зону общего пользования. В соответствии с современными нормативными требованиями должны быть реализованы следующие условия:

- доступность с учетом расстояний и характеристик путей движения к зонам обслуживания;
- безопасность путей движения, включая эвакуационные маршруты, а также зоны целевого назначения и оказания услуг, места работы;
- условия для оперативной и беспрепятственной эвакуации из здания или сооружения в пожаробезопасные зоны с целью минимизации воздействия опасных факторов пожара;
- обеспечение условий для своевременного получения полной и точной информации, необходимой для перемещения к целевому месту и при получении услуги [7].

После рассмотрения основных функций и структуры проекта культурного центра следует более подробно остановиться на его объемном решении и пространственной организации.

Объемное решение проектируемого здания в плане представляет собой Г-образную форму, которая делится на два главных функциональных блока и соединяется переходной галереей. Первый блок располагается с ул. Большой Садовой и является главным функционально-досуговым центром. Композиция данного объема была организована с учетом контекста окружающей застройки. Так как по обе стороны проектируемого объекта находятся исторические здания – главный корпус университета, конструктивистский дом – был проведен анализ композиции фасадов существующих зданий и составлена композиционная сетка, по которой была выстроена композиция нового здания. Было решено поделить фасад на три части, одна представляет собой активный элемент остекления, который поворачивается на 10 ° для придания динамики фасаду, а также является продолжением галереи и атриума. Две другие части по бокам представляют собой хаотично расположенные окна и глухие элементы – панели из туфа, которые чередуются между собой в хаотичном порядке, что придает зданию современный облик.

На первом этаже блока располагается входной узел, который включает распределительное пространство вестибюля, гардеробную, санитарные блоки, книжный магазин, также здесь осуществляется соединение двух зданий. Так, из пространства главного корпуса ЮФУ по переходному коридору можно попасть в новое здание культурного центра. Предлагается продлить коридор между помещением ученого совета и конференц-залом и довести до нового корпуса. Также здесь располагаются лифтовые узлы, эвакуационные лестницы с выходом на улицу.

На втором этаже блока планируется размещение танцевальных репетиционных залов с раздевалками и тренерскими комнатами, а также помещений для репетиций хора и оркестра для представлений в зрелищном зале.

Третий этаж отведен под библиотеку с читальными залами современного типа. У студентов будет возможность почитать учебную литературу, подготовиться к занятиям в приятной обстановке с обилием растений. Здесь также будут располагаться архивы, кабинеты сотрудников библиотеки, санитарные узлы.

Четвертый этаж включает кабинеты администрации, аудитории для выступлений спикеров, проведения мастер-классов, курсов дополнительного образования, планируется организовать компьютерный класс с доступом к ресурсам университета.

На пятом этаже предполагается размещение бизнес-центра для стартапов студентов университета. В планах создание программ поощрения для одаренных студентов, которые включают помощь в составлении бизнес-планов, проведение мастер-классов по созданию бизнеса, выступления известных бизнесменов области, выпускников университета.

На кровле данного блока планируется размещение установок для получения альтернативных источников энергии. Здесь также располагается атриум, который проходит по всем этажам блока и благодаря которому перед студентами во время передвижения между помещениями открывается вид на галерею.

Следующий блок находится на ул. Суворова между историческими зданиями жилого фонда и административного типа. Главная функция блока – проведение мероприятий университета.

На первом этаже располагается входной узел, который включает в себя: распределительное пространство вестибюля, кассовые кабины, гардеробную, лифтовый блок, санитарные узлы, а также пространство ресторана, который работает на основе привозного сырья. Ресторан рассчитан на 250 чел. одновременного пребывания. Он может быть трансформирован в зависимости от потребностей культурного центра. Дизайн ресторана был разработан таким образом, чтобы в случае необходимости сиденья для посетителей можно было либо убрать, либо добавить.

На втором этаже блока находится зрительный зал, который рассчитан на 500 посадочных мест, а также буфет для посетителей концерта и санитарный блок.

Пространство переходной галереи представляет собой каркас из металлических ферм, удерживаемый на опорах, который облицован стеклянными панелями. По форме со стороны фасада он является прямоугольным с односкатной стеклянной кровлей. Данная линия остекления проходит через все здание и заканчивается интересным остеклением фасада с поворотом стеклянной

панели со стороны ул. Большой Садовой. В галерее планируется размещение зала ресторана, а также многофункционального выставочного пространства для разного типа выставок. Галерея является в основном открытым местом и может быть использована под различные нужды университета в зависимости от необходимости.

Культурный центр также имеет внутренний двор, в котором планируется размещение рекреационной зоны, искусственного водоема, растительности, деревьев. Территория будет озеленена с использованием современных приемов ландшафтного дизайна, планируется наличие водной поверхности с фонтанами и переходными платформами. Также здесь будет расположен амфитеатр, в котором могут проходить различные семинары на открытом воздухе в летнее время, а студенты могут проводить свой досуг и отдыхать от занятий во время перерыва.

Таким образом, объем здания представляет собой гармоничную форму, которая четко вписывается в облик квартала. Со стороны ул. Большой Садовой была поддержана композиция окружающих исторических зданий, со стороны ул. Суворова проанализирована существующая ситуация норм инсоляции ближних зданий и выявлена формула наиболее допустимой высотности нового блока и переходной галереи. Также необходимо было учесть возможность организации пожарных проездов и отступа от существующих зданий. Облик и планировочное решение в основном непосредственно исходили из соответствия этим нормам проектирования. Объем несет в себе главную идею остекленного перехода, который проходит через все здание сплошной полосой и соединяет два корпуса. Культурный центр имеет интересные, многофункциональные, современные планировочные решения.

На основе предложенного объемного решения и анализа потребностей студентов можно перейти к более детальному рассмотрению самого процесса проектирования культурного центра для ЮФУ. В настоящем исследовании проблема, требующая решения, была четко обозначена: недостаток пространства для внеучебной культурной деятельности. На этом фоне создание культурного центра, отвечающего потребностям студентов и преподавателей, стало важной задачей, выполняемой с учётом требований современного образования и культурной жизни университета.

Пошаговый процесс решения проблемы :

1. Анализ потребностей студентов и администрации с помощью опроса.
2. Определение основных функций нового культурного центра.
3. Разделение на функциональные блоки для удобства эксплуатации и логичной организации пространства.
4. Проработка связей между блоками и помещениями, что обеспечит удобные и эффективные маршруты передвижения.
5. Организация общих буферных зон, что позволит равномерно распределить потоки и создать зоны для отдыха и общения.
6. Проработка композиционного решения, направленная на гармоничное вписывание нового здания в окружающий контекст.
7. Отработка фасадов и интерьеров, которые придадут зданию современный и функциональный вид, соответствующий требованиям университета.

### Выводы

Культурный центр для Южного федерального университета является примером уникального здания, которое отвечает специфическим потребностям учащихся и преподавателей. Такой центр, ориентированный на университетскую аудиторию, должен быть тщательно спроектирован с учетом запросов и функциональных требований.

Важно, чтобы такие центры обладали качествами multifunctionality и гибкости, что позволит адаптировать их пространство под различные нужды.

Культурный центр становится связующим звеном для университетских кампусов, обеспечивая пространство для нетворкинга, культурного и интеллектуального обмена, а также для реализации творческого потенциала студентов. В мире, где происходит постоянное развитие образовательных технологий и культурной жизни, такие объекты становятся неотъемлемой частью университетской среды.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ArchDaily : [сайт]. URL: <http://archdaily.com/> (дата обращения: 21.02.2025).
2. Бенаи Х.А., Коломийцева А.А. Современные тенденции при формировании архитектуры культурно-просветительских центров // Строитель Донбасса. 2024. № 2. С. 17–22.
3. Березина Е.А. Исторические предпосылки формирования архитектурной типологии «культурный центр» // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Градостроительство : сборник статей. Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 21–27. EDN: UGSRTJ
4. Восполнение квартала : проект реконструкции комплекса Высшей школы экономики // Архитектурный вестник : [сайт]. URL: <https://archvestnik.ru/2010/11/15/vospolnenie-kvartala-proekt-rekonstrukcii-kompleksa-vysshey-shkoly-ekonomiki/> (дата обращения: 21.02.2025).
5. Дуцев М.В. Концепция архитектуры современного Центра искусств : специальность 18.00.01 «Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Дуцев Михаил Викторович. Нижний Новгород, 2005. 32 с.
6. Кузнецов П.Э., Диденко С.В. Особенности формирования культурно-зрелищного комплекса в пространственной городской среде // Научный Лидер. 2022. № 6 (51). URL: <https://scilead.ru/article/1723-osobennosti-formirovaniya-kulturno-zrelischn> (дата обращения: 21.01.2025).
7. СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 904/пр : дата введения 2021-07-01 / подготовлен к утверждению Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). 2020. URL: <https://nko-expert.ru/assets/files/pdf/sp59-13330-2020.pdf> (дата обращения: 21.02.2025).

### REFERENCES

1. ArchDaily. Available: <http://archdaily.com/> (accessed February 21, 2025).
2. Benai Kh.A., Kolomiytseva A.A. Modern Trends in Architecture of Cultural and Educational Centers. *Stroitel Donbassa*. 2024; (2): 17–22. (In Russian)
3. Berezina E.A. Historical Prerequisites for the Formation of Architectural Typology “Cultural Center”. In: Coll. Papers ‘Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Urban Planning’. Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 2015. Pp. 21–27. EDN: UGSRTJ (In Russian)

4. Replenishment of the Block: Reconstruction Project of the Higher School of Economics Complex. *Arkhitekturnyi vestnik*. Available: <https://archvestnik.ru/2010/11/15/vospolnenie-kvartala-proekt-rekonstrukcii-kompleksa-vysshey-shkoly-ekonomiki/> (accessed February 21, 2025). (In Russian)
5. Dutsev M.V. "Architectural concept of modern art center". PhD Abstract. Nizhny Novgorod, 2005. 32 p. (In Russian)
6. Kuznetsov P.E., Didenko S.V. Formation of Cultural and Entertainment Centers in the Spatial Urban Environment. *Nauchny Lider*. 2022; 6 (51). Available: <https://scilead.ru/article/1723-osobennosti-formirovaniya-kulturno-zrelishchn> (accessed January 21, 2025). (In Russian)
7. SP 59.13330.2020. Accessibility of buildings and structures for people with limited mobility. Approved and enacted by the order No. 904/pr of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 30.12.2020. Available: <https://nko-expert.ru/assets/files/pdf/sp59-13330-2020.pdf> (accessed February 21, 2025). (In Russian)

#### **Сведения об авторе**

*Шевченко Ксения Дмитриевна*, магистрант, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344082, г. Ростов-на-Дону, пр. Будёновский, 39, [shevchenkokseniya13@gmail.com](mailto:shevchenkokseniya13@gmail.com)

#### **Author Details**

*Kseniia D. Shevchenko*, Graduate Student, The Academy of Architecture and Arts of Southern Federal University, 39, Budennovskii Ave., 344082, Rostov-on-Don, Russia, [shevchenkokseniya13@gmail.com](mailto:shevchenkokseniya13@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 02.04.2025  
Одобрена после рецензирования 26.05.2025  
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 02.04.2025  
Approved after review 26.05.2025  
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 64–87.

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 (5): 64–87.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-64-87

EDN: FRGMLO

### «БРУТАЛЬНЫЕ» ПОСТРОЙКИ ЛЕ КОРБЮЗЬЕ В АХМАДАБАДЕ (ИНДИЯ, 1951–1957 ГОДЫ)

**Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова**

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

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью глубокого осмысления трансфера и адаптации принципов западноевропейского модернизма в инокультурной среде. Творческое наследие Ле Корбюзье в Индии, в частности его проекты в Ахмадабаде, представляет собой уникальный пример синтеза международного стиля с местными строительными традициями и ответа на вызовы экстремального тропического климата.

**Целью** работы является комплексный анализ архитектурно-строительных и дизайнерских решений четырех ключевых объектов Ле Корбюзье в Ахмадабаде (1951–1957 гг.) – здания Ассоциации владельцев мельниц, вилл Шодхан и Сарабхай, а также музея Санскар Кендра – для выявления стратегий адаптации его авторского метода к социально-культурному и природному контексту региона.

**Результаты.** В ходе исследования выявлены и систематизированы ключевые авторские приемы Ле Корбюзье, обеспечившие органичное внедрение новаций европейского модернизма в архитектурную практику Индии. Доказано, что ахмадабадские постройки Ле Корбюзье стали не только воплощением его пяти принципов новой архитектуры, но и лабораторией для разработки устойчивых архитектурных стратегий, актуальных для всего тропического пояса.

**Ключевые слова:** Индия, штат Гуджарат, Ахмадабад, Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), здание Ассоциации владельцев мельниц и текстильных фабрик, вилла Шодхан, вилла Манорама Сарабхай, музей Санскар Кендра, вертикальные сады, бассейны, солнцезерезы (бриз-солеи)

**Для цитирования:** Поляков Е.Н., Полякова О.П. «Брутальные» постройки Ле Корбюзье в Ахмадабаде (Индия, 1951–1957 годы) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 64–87. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-64-87. EDN: FRGMLO

## ORIGINAL ARTICLE

### LE CORBUSIER'S BRUTALIST BUILDINGS IN AHMADABAD (INDIA, 1951–1957)

**Evgenii N. Polyakov, Ol'ga P. Polyakova**

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

**Abstract.** The relevance of this work is determined by the need for understanding a transfer and adaptation of Western European modernist principles to the foreign cultural environment.

Le Corbusier's creative legacy in India, particularly his projects in Ahmedabad, represents a unique example of the synthesis of international style and local building traditions and a response to challenges of an extreme tropical climate.

*Purpose:* The aim of this work is to comprehensively analyze architectural and design solutions of four key Le Corbusier buildings in Ahmedabad (1951–1957): the Mill Owners' Association building, the Shodhan and Sarabhai villas, and the Sanskar Kendra Museum in order to identify a strategy for adapting his method to the socio-cultural and natural aspects of the region.

*Research findings:* The paper identifies and systematizes Le Corbusier's key architectural techniques that integrate European modernist innovations into Indian architectural practice. It is proven that Le Corbusier's Ahmedabad buildings not only embody his five principles of new architecture, but also serve as a laboratory for developing architectural strategies relevant to the entire tropical zone.

**Keywords:** India, Gujarat, Ahmedabad, Sh.-E. Jeanneret-Gris (Le Corbusier), Mill and Textile Factory Owners Association, Shodhan Khan Villa, Manorama Sarabhai Villa, Sanskar Kendra Museum, vertical garden, basin, brise-soleil

**For citation:** Polyakov E.N., Polyakova O.P. Le Corbusier's Brutalist Buildings in Ahmedabad (India, 1951–1957). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 64–87. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-64-87. EDN: FRGMLO

Настоящая статья является логичным продолжением нашей предыдущей публикации [1], посвященной творческой деятельности французского зодчего Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) в Индии. Здесь он в 1950–1960 гг. при поддержке премьер-министра Джавахарлала Неру занимался проектными работами сразу в двух городах – Ахмадабаде и Чандигархе.

Статья посвящена четырем проектам, реализованным в Ахмадабаде: Ле Корбюзье был приглашен в Ахмадабад для проектирования городского музея, здания для влиятельных владельцев фабрик и двух вилл. Строители Чандигарха и Ахмадабада ставили перед собой две совершенно разные цели: один город создавался на пустом месте, но с явными политическими, идеологическими и мифическими мотивами, а другой – в уже существующей городской среде с более скромными мотивами. Чандигарх был призван демонстрировать высокий уровень, а Ахмадабад – исследовать природу жизни [2].

Ахмадабад (англ. Ахмедабад) – самый крупный город штата Гуджарат, расположенного на западе Индии. Он был основан в 1411 г. и назван в честь султана Ахмад-шаха I (1411–1442 гг.). В настоящее время является административным центром Ахмадабадского округа, его население насчитывает около 5,6 млн человек.

С середины XIX в. здесь процветает текстильная промышленность, поэтому этот город часто называют «Манчестер Востока». В 1861 г. появилась первая текстильная фабрика, а уже в 1905 г. их число достигло 33. В настоящее время Ахмадабад является крупнейшим в Индии поставщиком хлопчатобумажной ткани и одним из крупнейших экспортеров драгоценных камней и ювелирной продукции. Видимо, поэтому первыми заказчиками Ле Корбюзье стали наиболее богатые текстильные фабриканты и владельцы мельниц. Архитектор получил от Суроттама Хутисинга (президента Ассоциации владельцев мельниц и фабрик) заказ на проектирование в Ахмадабаде штаб-квартиры данной организации. Это было первое из двух общественных зданий, построенных Ле Корбюзье в этом городе.



### Здание Ассоциации владельцев мельниц и текстильных фабрик (1950–1954 гг.)

Здание Ассоциации размещено между автомобильной трассой Ашрам-роуд на западе и р. Сабармати на востоке. Оно отличается лаконичным фасадом, криволинейными и угловатыми формами внутри (рис. 1).



Рис. 1. Здание Ассоциации владельцев мельниц и текстильных фабрик в Ахмадабаде. Видовые точки главного фасада и наружной галереи<sup>1</sup>

Fig. 1. Main facade and exterior gallery of the Mill Owners' Association Building in Ahmedabad

Вероятно, г. Ахмадабад стал для Шарля-Эдуарда своеобразным испытательным полигоном для апробации пластических возможностей железобетонных конструкций. Ведь это был совершенно новый строительный материал для южноазиатского региона: «Ле Корбюзье построил несколько сооружений для промышленной элиты Ахмадабада, центра индийского текстильного производства. Фасад здания Ассоциации владельцев ткацких фабрик в Ахмадабаде был разделен на глубокие ячейки, стены которых поставлены под углом. Внутри Корбюзье использовал изогнутые, пластичные линии...» [3].

<sup>1</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Fcorbusier.totalarch.com%2Ffiles%2Fbuild%2F052%2F012.jpg&lr=67&pos=9&rpt=simage&source=serp&text=Здание%20Ассоциации%20владельцев%20мельниц%20в%20Ахмадабаде](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fcorbusier.totalarch.com%2Ffiles%2Fbuild%2F052%2F012.jpg&lr=67&pos=9&rpt=simage&source=serp&text=Здание%20Ассоциации%20владельцев%20мельниц%20в%20Ахмадабаде)

При проектировании данного здания Ле Корбюзье пришлось учитывать тропический климат региона. В процессе работы он поначалу опирался на свои творческие эксперименты в Тунисе, Алжире и Аргентине, а позже – на особенности индийской народной архитектуры. Когда Ле Корбюзье начал работать в более теплых регионах, он разработал ряд архитектурных приемов, отвечающих местным климатическим и культурным условиям. Он черпал вдохновение в народной архитектуре Индии, подражая глубоким нишам, нависающим выступам, теневым экранам и большим залам с колоннами. «Он ввел в обиход *бриз-солеи*, предназначенные для защиты фасада от солнца, и использовал их в сочетании с утолщенными фасадами и необработанным бетоном во многих своих более поздних проектах. Здание Ассоциации владельцев мельниц, окруженное большим количеством открытого пространства, не было вынуждено конкурировать с существующей городской застройкой, что позволило архитектору предложить совершенно новый эстетический подход...» [4].

Восточный и западный фасады этого здания украшены изящными солнцезащитными (*бриз-солеями*). Жалюзи на западном фасаде расположены по диагонали, чтобы закрывать вид с улицы, но при этом пропускать воздух и непрямой солнечный свет. С решеток фасада свисают живописные растения, оживляя открытый бетон и дополняя сад на крыше (рис. 2).



Рис. 2. Западный фасад здания Ассоциации владельцев мельниц в Ахмадабаде. Видовые точки солнцезащитных жалюзи и элементов озеленения<sup>2</sup>

Fig. 2. Sunshades and greenery elements of the western facade of the Mill Owners' Association Building in Ahmedabad

С улицы можно увидеть листву, свисающую с многочисленных террас на двух нижних этажах здания, – явный предшественник популярного сейчас движения за создание вертикальных садов. Стена по всей длине здания, облицованная местным речным камнем, напоминает о р. Сабармати, которая когда-то плескалась у края ландшафтных садов здания. Крыша была спроектирована таким образом, чтобы на ней можно было выращивать растения на гидропонике, что также помогало бы охлаждать здание летом. Террасы с растительными гирляндами защищают окна от прямых солнечных лучей и имеют достаточную глубину и высоту для обеспечения поперечной вентиляции [5].

<sup>2</sup> URL: [https://corbusier.totalarch.com/ahmedabad\\_mill\\_owners\\_association?ysclid=mc0hyljgxm487058992](https://corbusier.totalarch.com/ahmedabad_mill_owners_association?ysclid=mc0hyljgxm487058992)

На восточной стороне здания бриз-солеи установлены перпендикулярно фасаду. Это позволяет речному бризу проникать в помещения через затененный периметр. По словам Ле Корбюзье, «расположение здания в саду, возвышающемся над рекой, создает живописное зрелище: красильщики стирают и сушат свои хлопчатобумажные ткани на песчаном берегу в компании цапель, коров, буйволов и ослов, которые наполовину погружены в воду, чтобы охладиться. Такая панорама была приглашением к созданию видов с каждого этажа здания» [4].

Северная и южная стены сложены из необработанного камня с грубой кирпичной облицовкой. Они даже не имеют полноценных световых проемов. Церемониальный пандус на западном фасаде завершен входом в вестибюль тройной высоты, открытый ветру. На первом этаже размещены рабочие помещения клерков и отдельная одноэтажная столовая в задней части здания, на втором этаже – кабинеты руководителей и зал заседаний, на третьем – высокий, хорошо освещенный конференц-зал с козырьком на крыше и просторный вестибюль (рис. 3, 4).

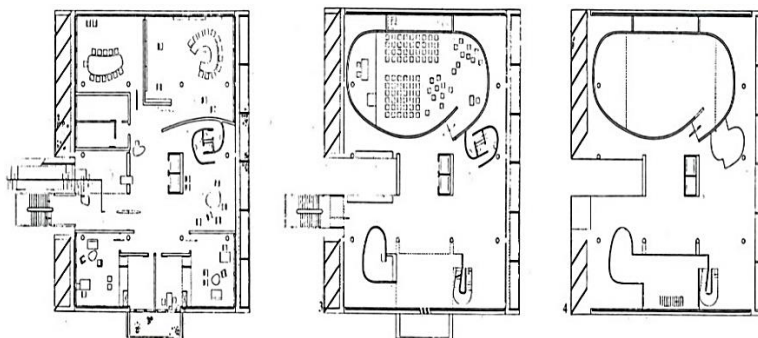


Рис. 3. Планы этажей здания Ассоциации владельцев мельниц в Ахмадабаде<sup>3</sup>  
Fig. 3. Floor plans of the Mill Owners' Association Building in Ahmedabad

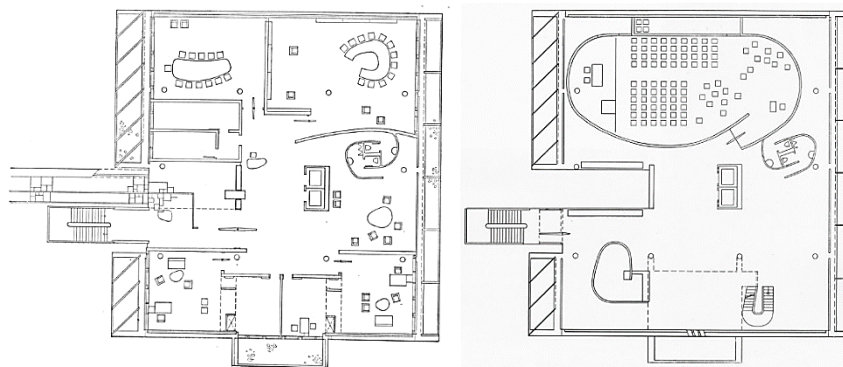


Рис. 4. Планы 1-го и 2-го этажей здания Ассоциации владельцев мельниц в Ахмадабаде<sup>4</sup>  
Fig. 4. Plans for 1, 2 floors of the Mill Owners' Association Building in Ahmedabad

<sup>3</sup> URL: <https://www.archdaily.com/464142/ad-classics-mill-owners-association-building-le-corbusier/52b7cdcee8e44e5f02000159-ad-classics-mill-owners-association-building-le-corbusier>

<sup>4</sup> URL: [https://corbusier.totalarch.com/ahmedabad\\_mill\\_owners\\_association](https://corbusier.totalarch.com/ahmedabad_mill_owners_association)

Фасады и конструктивные схемы этажей этого здания имеют ярко выраженные ортогональные очертания. Они резко контрастируют с внутренними пространствами, для которых характерны криволинейные формы. Плоские и криволинейные стены интерьеров вызывают у посетителей ощущения поочередного «сжатия» и «расширения». Конференц-зал, окруженный криволинейной кирпичной стеной, обшитой деревянными панелями, возносится от второго этажа до крыши. Его изогнутый потолок отражает свет, проникающий через слуховое окно. Он также включает зеркальный бассейн, который Ле Корбюзье собирался использовать на крыше в качестве водного резервуара.

Фасады дома имеют глубокие ячейки, рамы которых поставлены под углом и формируют направления тени. Поэтому кажется, что в этом здании всегда прохладно. В итоге получилась открытая, продуваемая ветром структура из грубого бетона (*beton brut*): «Внутри бетонной сетки растут деревья, а к главному входу ведет бетонный пандус. Главный холл разрезает здание пополам, занимая три ячейки по вертикали. В самом здании всего несколько офисов, но при этом очень много открытых пространств, предназначенных для приемов и собраний. И в отличие от внешней коробки здания, с ее регулярными формами, внутри Корбюзье использовал изогнутые пластичные линии, – например, в плавных изгибающихся стенах главного зала» [4].

Полы и стены жилых комнат облицованы черным и темно-синим делийским морак-камнем, зеркально отражающим все детали их интерьеров.

Строительство этого здания заняло около четырех лет, но не все шло гладко. Между владельцами фабрики и Ле Корбюзье неоднократно возникали разногласия. На помощь иностранному зодчему пришел Балкришна Виталдас Доши (1927–2023). Это был молодой ученик Ле Корбюзье, который взял на себя руководство строительством. Впоследствии он стал одним из ведущих индийских архитекторов, лауреатом Притцкеровской премии и кавалером золотой медали RIBA, автором более ста реализованных проектов (рис. 5).

В настоящее время Ассоциация владельцев мельниц сдает здание в аренду для проведения различных праздников и общественных мероприятий.

Ле Корбюзье воспроизвел отдельные композиционные детали этого здания в Карпентерском центре изобразительных искусств (г. Кембридж, штат Массачусетс, США, 1963 г.) (рис. 6).

### **Вилла Шодхан (Shodhan House, 1951–1956 гг.)**

Суроттам Хутисинг, в свое время заказавший Ле Корбюзье строительство штаб-квартиры рассмотренной выше Ассоциации, в 1951 г. попросил его также спроектировать частную резиденцию (виллу) для своей будущей семьи. Построив дом, он хотел продемонстрировать свое социальное и экономическое положение перед предстоящей свадьбой. Однако реализовать этот проект не удалось. Позже проект был продан другому владельцу мельницы – Шьямубхаю Шодхану, который решил сохранить первоначальные планы [6].

В 1956 г. на этом участке была построена вилла Шодхан (Shodhan House). Ее архитектурное решение, сочетающее древневосточные традиции с концептуальными теориями начала XX в., достаточно необычно. По мнению Ле Корбюзье, пространство, свет и порядок – это то, что нужно людям так же сильно,



как базовые потребности. То есть французский зодчий постарался обеспечить максимально комфортные условия проживания обитателям этого дома, сделав его более «прохладным». Этот принцип особенно важен для Индии с ее экстремальными климатическими условиями, поэтому вилла была возведена с учетом особенностей местного ландшафта, чтобы солнце, ветер и видовые панорамы были открыты во всех частях здания. При проектировании виллы Шодхан учитывались такие ключевые аспекты, как солнце, ветер, вид из окон и ландшафтный дизайн. Прежде всего, это было достигнуто за счет расположения фасадов, которые, будучи ориентированными по диагонали, позволяли посетителю лицезреть три четверти здания. Ландшафтный дизайн подчеркивает красоту виллы, контрастируя с изогнутыми холмами участка и геометрическими прямоугольными линиями строения. Прямоугольники на северо-западном и юго-западном фасадах дополнительно подчеркиваются установкой солнцезащитных козырьков для защиты от бликов [6]. «Пространственная версия <...> подчинена задаче защитить людей от солнечного перегрева, открывая путь протекающему сквозь здание бризу» [2].

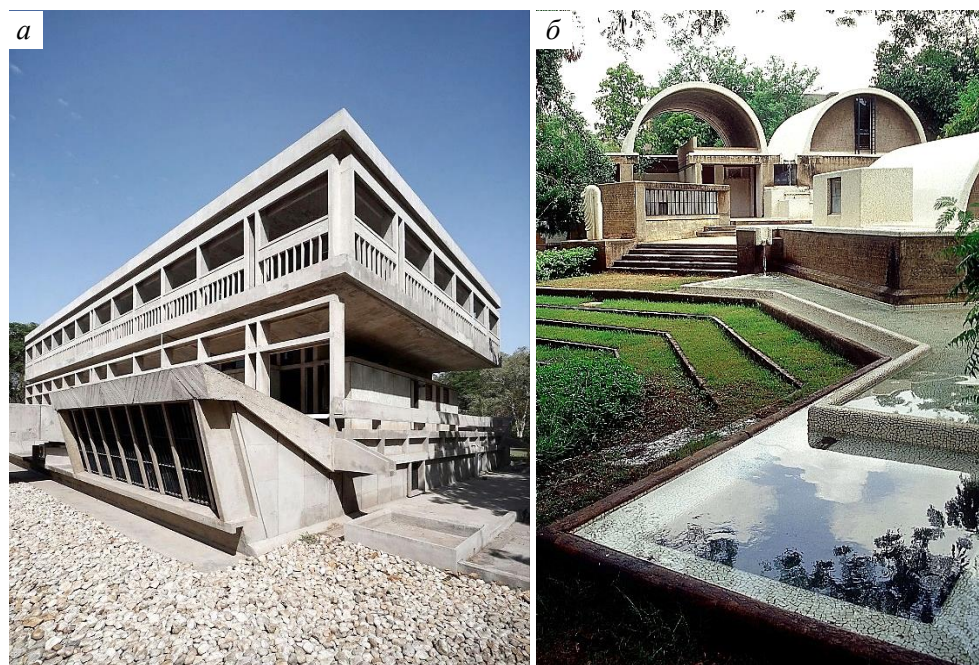


Рис. 5. Реализованные проекты Б.В. Доши:

*a* – Институт индологии в Ахмадабаде (1962 г.)<sup>5</sup>; *б* – собственная студия архитектора «Сангат» в Ахмадабаде (1981 г.)<sup>6</sup>

Fig. 5. Completed projects by B.V. Doshi:

*a* – institute of Indology in Ahmedabad, 1962; *b* – the architect's own studio Sangat in Ahmedabad, 1981

<sup>5</sup> URL: <https://www.re-thinkingthefuture.com/case-studies/a5443-the-institute-of-indology-by-b-v-doshi-inspired-by-indian-buildings/>

<sup>6</sup> URL: <https://arche-study.com/sangath-b-v-doshis-studio/>

Рис. 6. Карпентерский центр изобразительных искусств<sup>7</sup>

Fig. 6. Carpenter Center for the Visual Arts

Здание выполнено из бетона. Оно включает сады, террасы и солнцезащитные козырьки (brise-soleil): «Вилла Ш. Шодхана – кубический объем под плитой-зонтом на пилотах, с трехмерным фасадом, образованным сочетаниями плит-солнцезащитных» [2].

Ле Корбюзье умело встраивал в свои проекты различные символические элементы. Вилла Шодхан – это отражение не только индийского социокультурного контекста, но и более широких философских основ архитектурного творчества. Бриз-солей, или солнцезащитный навес, – это не только эффективный способ защиты комнат от палящего тропического солнца, но и элемент дизайна, воплощающий философию Ле Корбюзье о свете и тени. Использование солнцезащитных козырьков свидетельствует о том, что создатель всегда соблюдал баланс между функциональностью и эстетикой: «Включение традиционного индийского узора “джали” (решетчатая ширма) в конструкцию солярия – еще один гениальный ход, демонстрирующий чуткость Ле Корбюзье к местным традициям и мастерству. Этот элемент еще больше связывает виллу с ее культурным контекстом» [7] (рис. 7).

Кроме того, Шарль-Эдуард постарался максимально реализовать в этом уникальном здании свои пять принципов архитектуры, которые, по его мнению, гармонично дополнили «климатические эксперименты», рассмотренные выше: «Вилла Шодхан – лучшее воплощение пяти принципов архитектуры Ле Корбюзье и адаптации к индийскому климату» [3].

Вилла Шодхан в Ахмадабаде является типичным примером модернистской архитектуры. Она демонстрирует принципы «международного стиля» Ле Корбюзье, для которого характерны преобладание пространства над массой, использование легких строительных материалов и интеграция конструкции в окружающую среду с помощью больших горизонтальных раздвижных окон.

В интерьерах этой виллы использованы элементы традиционных домов Ахмадабада. Чтобы это здание вписывалось в культуру и стиль Ахмадабада, Ле Корбюзье включил в него элементы старых домов города, в том числе родовой резиденции Шодхан. Наиболее заметным отражением этого является гостиная

<sup>7</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Fpbs.twimg.com%2Fmedia%2FEEEZePQVAAAaJRE.jpg&lr=67&pos=5&rpt=simage&source=serp&text=Карпентерский%20центр%20изобразительных%20искусств%20в%20Кембридже%2C%20штат%20Массачусетс](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fpbs.twimg.com%2Fmedia%2FEEEZePQVAAAaJRE.jpg&lr=67&pos=5&rpt=simage&source=serp&text=Карпентерский%20центр%20изобразительных%20искусств%20в%20Кембридже%2C%20штат%20Массачусетс)



с потолком двойной высоты на первом этаже. Традиционно входы в старые дома Ахмадабада были с потолками двойной высоты, что свидетельствовало о роскоши и статусе. Эта адаптация, наряду с открытой планировкой здания, позволила интегрировать виллу Шодхан в индийскую среду [6, 8].



Рис. 7. Вилла Шодхан, г. Ахмадабад, Индия, 1951–1956 гг. Видовые точки<sup>8</sup>  
Fig. 7. Villa Shodhan, Ahmedabad, India, 1951–1956

Конструкция виллы Шодхан проста в структурном плане, но при этом сохраняет пластичность в обработке разделенных пространств. Общий каркас здания выполнен из необработанного бетона с четкими следами деревянной опалубки. Каркас закреплен на земле, а не приподнят на сваях, что Ле Корбюзье часто использовал в 1920-х гг. [8]. К нижней части внутренних потолков добавлен стандартный листовой металл, а в качестве крыши используется защитный зонт. Конструкция внутренних бетонных опор, проходящих по всей высоте здания, основана на проекте архитектора, разработанном в 1915 г. Пандус обеспечивает доступ на основной и антресольный этажи, а комнаты сгруппированы вокруг террасы высотой в три этажа. Пандус также ведет к сопутствующей лестнице, обеспечивающей доступ на крышу и террасу [6]. Терраса играет важную роль в естественном регулировании климата, охлаждая спальни в середине дня и предоставляя альтернативное место для сна в летнее время

<sup>8</sup> URL: <http://corbusier.totalarch.com/shodhan>



[8]. На террасе виллы Шодхан разбит сад с густой травой и водоемами. Впечатление от густой зелени также усиливается за счет разросшихся растений и деревьев, которые, кажется, маскируют здание и его окружение. На крыше также есть овальное отверстие, которое совпадает с отверстием в нижней части крыши, открывая посетителям вид на небо. Это почти то же самое, что и бассейн, расположенный у основания пандуса, который как бы впускает внутрь внешний мир [6].

В последний день своего визита в Ахмадабад, направляясь вместе со своим протеже Б.В. Доши к воротам виллы Шодхан, французский архитектор Ле Корбюзье оглянулся и сказал: «Пусть придут поколения и построят такое здание, какое вы видите здесь» [2] (рис. 8).



Рис. 8. Ле Корбюзье и Балкришна Виталдас Доши, 1955 г.:

*a* – в строящемся доме<sup>9</sup>; *б* – на собеседовании в ресторане<sup>10</sup>

Fig. 8. Le Corbusier and Balkrishnan Vitaldas Doshi in 1955:

*a* – in a house under construction; *b* – in restaurant

Период после 1945 г. стал для Ле Корбюзье временем размышлений и переоценки своих творческих возможностей. Это явно прослеживается в кардинальных изменениях его стиля, проявленных на вилле Шодхан. Эти изменения включают три основных аспекта.

Во-первых, это проявляется в учете особенностей естественного освещения, ветра, дождя и во включении в фасады здания растений (рис. 9).

Плоская крыша и связь между внутренними помещениями явно отражают влияние «Де Стейл» – нидерландской версии модернизма. Это можно видеть в окнах фасадов и жалюзи, где асимметрия, гибкость и пластичность были ключевыми элементами дизайна. Примерами могут служить картины Пита Мондриана и Дом Шредера (арх. Геррит Ритвельд, г. Утрехт, 1924 г.) (рис. 10).

Вилла Шодхан в какой-то мере повторила композиционные идеи предыдущих проектов Ле Корбюзье, построенных в 1920-х гг. Наиболее яркими при-

<sup>9</sup> URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/B.\\_V.\\_Doshi?ysclid=mfjgmid2yd477173109#/media/File:Le\\_Corbusier\\_Balkrishna\\_Doshi\\_Shodhan\\_House.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/B._V._Doshi?ysclid=mfjgmid2yd477173109#/media/File:Le_Corbusier_Balkrishna_Doshi_Shodhan_House.jpg)

<sup>10</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?img\\_url=https%3A%2F%2Fxxi.com.tr%2Fstorage%2Fuploads%2F2018%2F04%2Fbb736c5479a5a1e395723924fdd618ba.jpg&lr=67&pos=40&rpt=simage&source=serp&stype=image&text=Балкришна%20Виталдас%20Доши](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fxxi.com.tr%2Fstorage%2Fuploads%2F2018%2F04%2Fbb736c5479a5a1e395723924fdd618ba.jpg&lr=67&pos=40&rpt=simage&source=serp&stype=image&text=Балкришна%20Виталдас%20Доши)

мерами являются вилла Савой и «Дом Ситроен». Сходство между его виллой Савой и виллой Шодхан основано на пластичности дизайна и свободе, присущей этому стилю (рис. 11).



Рис. 9. Вилла Шодхан, Ахмедабад, Индия, 1951–1956 гг. Схема разреза, макет<sup>11</sup>  
Fig. 9. Longitudinal view and 3D model of the Villa Shodhan, Ahmedabad, India, 1951–1956

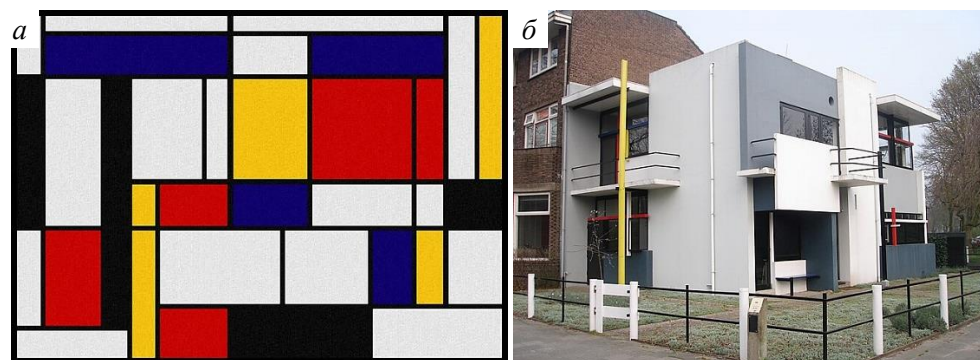


Рис. 10. Примеры «Де Стейл» эстетики:  
а – картина Пита Мондриана<sup>12</sup>; б – Дом Шредера<sup>13</sup>  
Fig. 10. Examples of De Stijl aesthetics:  
а – painting by Piet Mondrian; б – House of Truss Schroeder

Ле Корбюзье глубоко ценил взаимосвязь между архитектурой и природой. Вилла Шодхан была спроектирована таким образом, чтобы использовать преимущества тропического климата и при этом обеспечить комфортное и эстетичное пространство для жильцов. Можно провести параллели между нею и «Домом Ситроен» Ле Корбюзье. Угловатая, строгая, геометрическая форма явно отражает лаконичные черты, присущие архитектуре начала XX столетия. Они же присущи и вилле Шодхан. Взаимосвязь систем вентиляции и затенения также подчеркивает это сходство.

<sup>11</sup> URL: <http://corbusier.totalarch.com/shodhan>

<sup>12</sup> URL: [https://ya.ru/images/search?imgurl=https%3A%2F%2Fidei.club%2Fsd%2Fuploads%2Fposts%2F2023-11%2F1701342153\\_idei-club-p-neoplastitsizm-v-arkhitecture-vkontakte-50.png&lr=12&pos=1&rpt=simage&source=related-duck&text=Пит%20Мондриан%20абстракционизм](https://ya.ru/images/search?imgurl=https%3A%2F%2Fidei.club%2Fsd%2Fuploads%2Fposts%2F2023-11%2F1701342153_idei-club-p-neoplastitsizm-v-arkhitecture-vkontakte-50.png&lr=12&pos=1&rpt=simage&source=related-duck&text=Пит%20Мондриан%20абстракционизм)

<sup>13</sup> URL: <https://i.pinimg.com/originals/20/81/6c/20816c854cc23cceb95f896cafb8232.jpg>

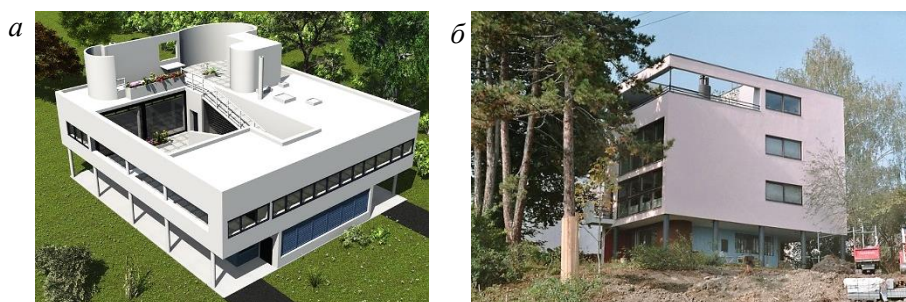


Рис. 11. Проекты, реализованные в 1920-х гг.:

*a* – вилла Савой в Пуасси (1928–1931 гг.)<sup>14</sup>; *б* – «Дом Ситроен» в пос. Вайсенхоф (Штутгарт, 1922–1927 гг.)<sup>15</sup>

Fig. 11. Building built in the 1920s:

*a* – Villa Savoye in Poissy, 1928–1931; *b* – Citroën House in the Weissenhof housing estate, Stuttgart, 1922–1927

Вилла Шодхан демонстрирует пять архитектурных принципов Ле Корбюзье – пилоты (опоры в виде столбов), сад на крыше, открытая планировка, длинные горизонтальные окна и «свободный» фасад. Именно в этом прекрасном здании можно видеть, как данные принципы сливаются в гармоничное целое. Рассмотрим их по порядку.

Использование пилотов позволило вилле органично вписаться в окружающую природу. Приподняв здание над землей, Ле Корбюзье создал ощущение его открытости и единства с окружающим ландшафтом. Эта особенность не только придала фантастический вид самому зданию, но и способствовала его естественной вентиляции, сохраняя прохладу в помещениях (рис. 12).

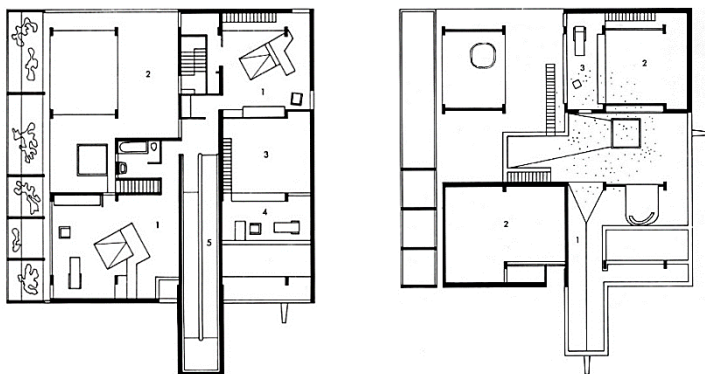


Рис. 12. Вилла Шодхан. Первый и второй уровни<sup>16</sup>

Fig. 12. First and second floors of the Villa Shodhan layout

<sup>14</sup> URL: [https://www.pixelrz.com/lists/ld/le-corbusier-savoye-house%0D%0A/?utm\\_medium=organic&utm\\_source=yandexsmartcamera](https://www.pixelrz.com/lists/ld/le-corbusier-savoye-house%0D%0A/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera)

<sup>15</sup> URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Weissenhof\\_photo\\_house\\_citrohan\\_east\\_fa%C3%A7ade\\_Le\\_Corbusier\\_%26\\_Pierre\\_Jeanneret\\_Stuttgart\\_Germany\\_2005-10-08.jpg?utm\\_medium=organic&utm\\_source=yandexsmartcamera](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Weissenhof_photo_house_citrohan_east_fa%C3%A7ade_Le_Corbusier_%26_Pierre_Jeanneret_Stuttgart_Germany_2005-10-08.jpg?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera)

<sup>16</sup> URL: [https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2023/05/Villa-Shodhan-Le-Corbusier-India-Ahmedabad-house-ArchEyes-EGA4\\_QDP\\_08\\_09\\_E4\\_LQ-11.jpg?ssl=1](https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2023/05/Villa-Shodhan-Le-Corbusier-India-Ahmedabad-house-ArchEyes-EGA4_QDP_08_09_E4_LQ-11.jpg?ssl=1)

*Открытая планировка* Ле Корбюзье позволяет свободно перемещаться по помещениям, которые адаптируются к потребностям жильцов. Этот выбор дизайна особенно важен в плане индийского культурного контекста, в котором часто делается акцент на совместном проживании и взаимодействии. Открытая планировка также способствует лучшей циркуляции воздуха, снижая потребность в механическом кондиционировании.

*Свободный фасад* – третий из пяти принципов Ле Корбюзье. Эта особенность позволяет свободно планировать внутреннее пространство, поскольку стены не несут нагрузки. На вилле Шодхан свободный фасад применяется для создания динамичных внутренних и внешних пространств, которые взаимодействуют с окружающей средой, сохраняя при этом приватность жильцов. Ле Корбюзье также использовал в дизайне виллы ряд пандусов, которые служат как функциональным, так и эстетическим целям. Пандусы обеспечивают вертикальное перемещение.

Использование *больших ленточных окон* в вилле демонстрирует стремление Ле Корбюзье наполнить все помещения естественным светом. Окна расположены таким образом, чтобы пропускать много дневного света и при этом уменьшить прямое воздействие солнечных лучей. Это еще раз отражает чуткость архитектора к местному климату (рис. 13).

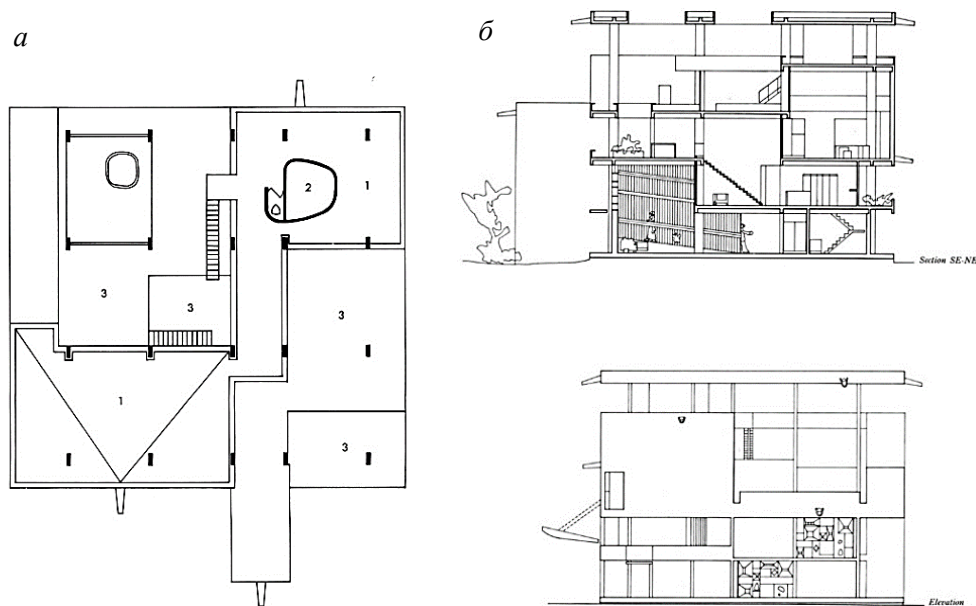


Рис. 13. Вилла Шодхан:

*a* – план третьего уровня<sup>17</sup>; *б* – разрез, боковой фасад<sup>18</sup>

Fig. 13. Villa Shodhan:

*a* – layout of the third floor; *b* – sectional view, side elevation

<sup>17</sup> URL: [https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2023/05/Villa-Shodhan-Le-Corbusier-India-Ahmedabad-house-ArchEyes-EGA4\\_QDP\\_08\\_09\\_E4\\_LQ-12.jpg?ssl=1](https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2023/05/Villa-Shodhan-Le-Corbusier-India-Ahmedabad-house-ArchEyes-EGA4_QDP_08_09_E4_LQ-12.jpg?ssl=1)

<sup>18</sup> URL: [https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2023/05/Villa-Shodhan-Le-Corbusier-India-Ahmedabad-house-ArchEyes-EGA4\\_QDP\\_08\\_09\\_E4\\_LQ-15.jpg?ssl=1](https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2023/05/Villa-Shodhan-Le-Corbusier-India-Ahmedabad-house-ArchEyes-EGA4_QDP_08_09_E4_LQ-15.jpg?ssl=1)



*Сад на крыше* – яркий пример того, как Ле Корбюзье объединил природу и архитектуру. Подобные проекты выполняют двойную функцию: они являются зонами отдыха, создавая открытое жилое пространство, и естественным изоляционным слоем для здания, помогая поддерживать комфортную температуру внутри. Этот блестящий дизайнерский ход повышает экологичность виллы, а также обеспечивает жильцам пышный зеленый оазис: «Почти шесть десятилетий спустя дом, построенный Корбюзье, поражает своей яркостью. Это бетонный куб, спроектированный таким образом, что он не является герметичной коробкой, а открыт для природных элементов. Комнаты расположены в тени навеса над крышей и выходят на большие террасы с видом на бассейн. Этот дом предназначен как для уединения, так и для отдыха на свежем воздухе, как для солнечного света, так и для тени» [9].

В настоящее время вилла используется как частная резиденция.

### **Вилла Сарабхай (Manorama Sarabhai, 1951–1956 гг.)**

Прямоугольная планировочная сетка виллы Сарабхай отражает геометрическую строгость Ле Корбюзье, но при этом соответствует индийскому контексту. Здание, возведенное на сваях, кажется легким и парящим над землей. Пространственная планировка сочетает в себе открытость и уединенность, удовлетворяя потребности семьи мадам Манорамы Сарабхай и создавая визуальные связи между внутренним и внешним пространствами (рис. 14).

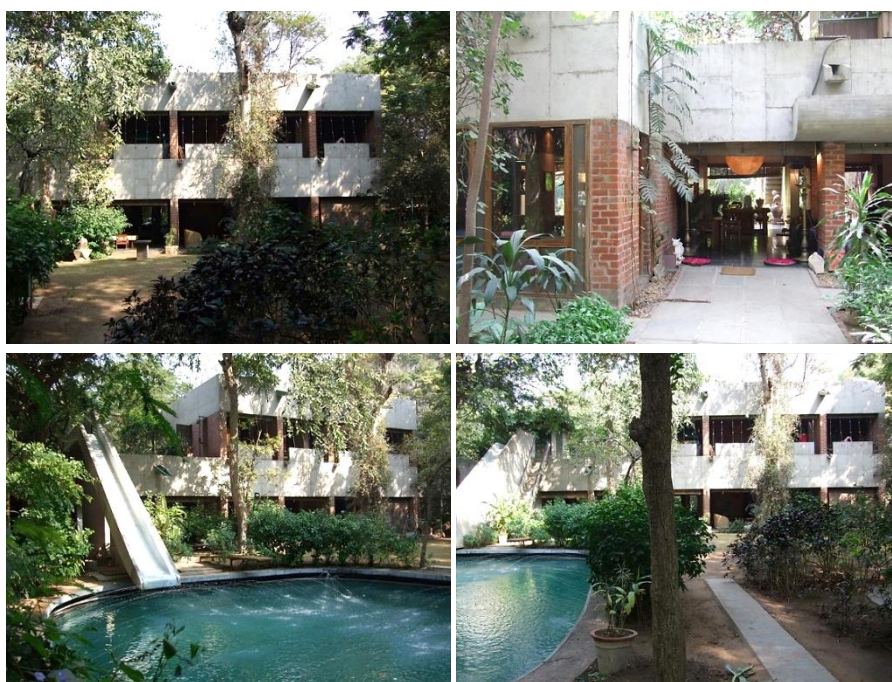


Рис. 14. Видовые точки юго-западного фасада виллы Сарабхай (1951–1956 гг.)<sup>19</sup>

Fig. 14. Southwestern facade of Madame Manorama Sarabhai's Villa (1951–1956)

<sup>19</sup> URL: <http://corbusier.totalarch.com/sarabhai>

Использование необработанного кирпича и бетона говорит о функционализме Ле Корбюзье и его внимании к местным строительным материалам. Текстура кирпича контрастирует с гладкостью бетона, создавая тактильное взаимодействие, которое перекликается с народными строительными технологиями, но при этом утверждает современную эстетику (рис. 15).



Рис. 15. Вилла Сарабхай. Сочетание кирпичной кладки и бетона на фасадах здания<sup>20</sup>  
Fig. 15. A combination of brickwork and concrete on facades of the Villa Sarabhai

Одна из особенностей виллы – сад на крыше, который является отличительной чертой дизайна Ле Корбюзье. Этот элемент снижает температуру внутри помещений за счет естественной изоляции и обеспечивает неразрывную связь между архитектурой и ландшафтом. Интеграция виллы с окружающей средой распространяется на большие веранды и затененные открытые площадки, создавая пространства, соответствующие жаркому климату Ахмадабада (рис. 16, 17).

Ле Корбюзье умело сочетает в данной вилле приватные и общественные пространства. Центральная гостиная выходит на улицу, что позволяет солнечному свету и воздуху проникать внутрь. В то же время приватные помещения остаются изолированными, обеспечивая баланс между открытостью и уединением (рис. 18).

За широким фронтоном скрываются цилиндрические своды перекрытий внутренних помещений. Такое завершение здания сводчатым перекрытием было одним из творческих приемов Корбюзье в 1950-е гг. Затем эта конструкция стала общим достоянием архитекторов всего мира (рис. 19).

По сравнению с другими жилыми проектами Ле Корбюзье вилла Сарабхай демонстрирует более явное стремление к визуальному слиянию с окружающей природой. В то время как Дом Шодхана опирается на монументальность и формальное выражение, дизайн виллы Сарабхай кажется более камерным и соответствующим окружающей обстановке: «Вилла, спроектированная Ле Корбюзье в 1950-х гг. для семьи Сарабхай в Ахмадабаде (Индия), демонстрирует его адаптацию принципов функционализма к тропическому климату. Являясь частью его более масштабной работы в Ахмадабаде, включающей здание

<sup>20</sup> URL: <http://corbusier.totalarch.com/sarabhai>



Ассоциации владельцев мельниц и дом Шодхан, вилла отражает его взаимодействие с местными культурными, климатическими и материальными условиями, знаменуя собой отход от европейских проектов Ле Корбюзье и исследование того, как современная архитектура может перекликаться с региональными традициями» [10].

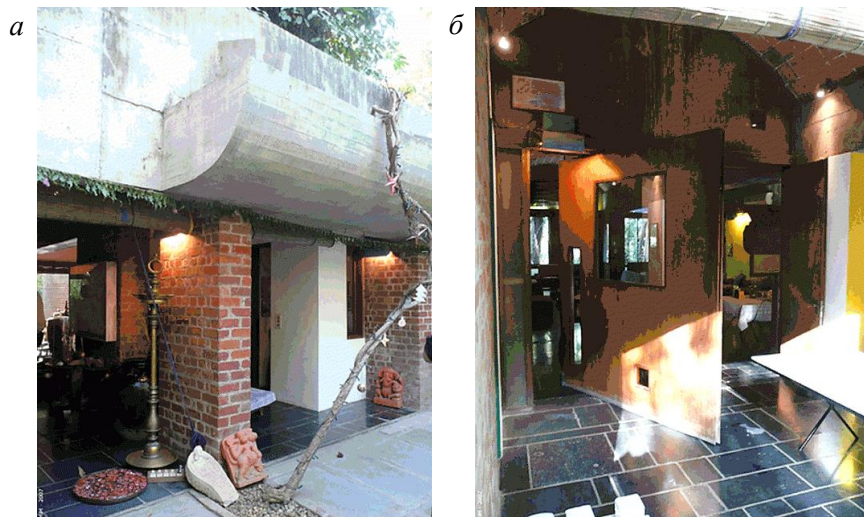


Рис. 16. Вилла Сарабхай<sup>21</sup>:

*a* – вход в виллу; *б* – поворотная дверь, похожая на вход во дворец Ассамблеи

Fig. 16. Sarabhai House:

*a* – entrance; *b* – revolving door similar to the entrance to the Assembly Palace

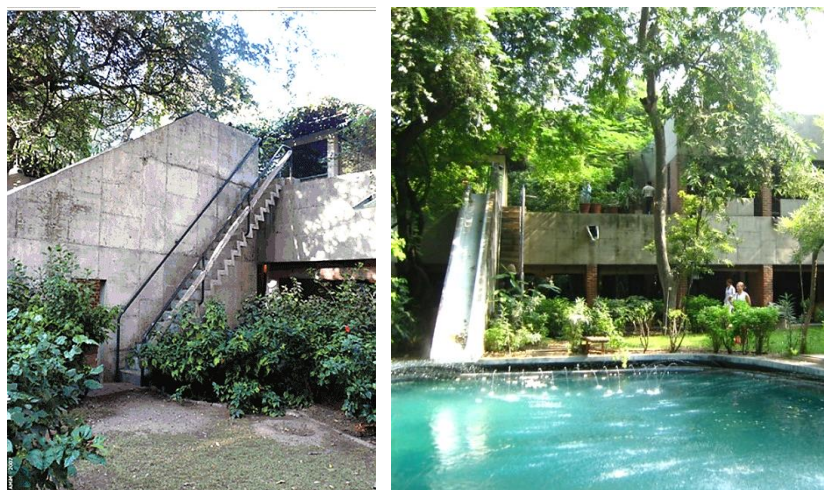


Рис. 17. Лестница в сад, примыкающая к водостоку. С помощью водостока с крыши наполняется бассейн в саду<sup>22</sup>

Fig. 17. Stairs to the garden adjacent to the drainpipe for filling the pool in the garden

<sup>21</sup> URL: [https://ic.pics.livejournal.com/george\\_44/10073425/261594/261594\\_original.gif](https://ic.pics.livejournal.com/george_44/10073425/261594/261594_original.gif)

<sup>22</sup> URL: [https://ic.pics.livejournal.com/george\\_44/10073425/263543/263543\\_original.jpg](https://ic.pics.livejournal.com/george_44/10073425/263543/263543_original.jpg)



Рис. 18. Интерьер виллы Манорамы Сарабхай. Видовые точки<sup>23</sup>  
 Fig. 18. Interior of Madam Manorama Sarabhai's Villa (1951–1956)

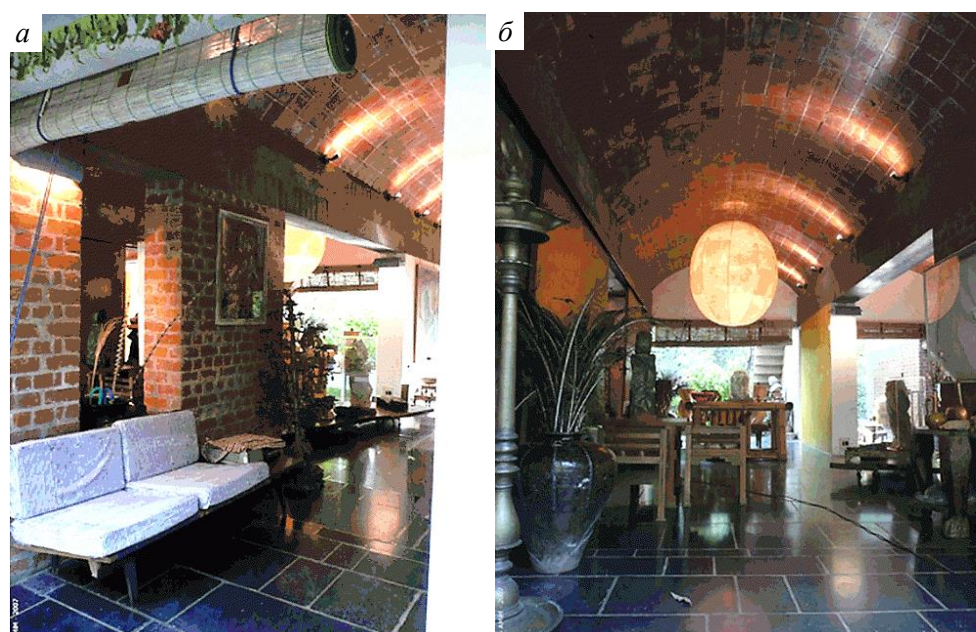


Рис. 19. Вилла Сарабхай<sup>24</sup>:

*a* – полы, покрытые гранитом, и сводчатые потолки из кирпича; *б* – пространства гостиной, свободно перетекающие из одного в другое, – одна из особенностей свободного плана

Fig. 19. Villa Sarabhai:

*a* – granite floors and vaulted brick ceilings; *b* – living room spaces that flow freely from one to another

### Музей Санскар Кендра, Ахмадабад (1954–1957 гг.)

Музей Санскар Кендра (Музей знаний), построенный по заказу Муниципальной корпорации Ахмадабада, был задуман жителями города как культур-

<sup>23</sup> URL: <http://corbusier.totalarch.com/sarabhai>

<sup>24</sup> URL: [https://ic.pics.livejournal.com/george\\_44/10073425/261778/261778\\_original.gif](https://ic.pics.livejournal.com/george_44/10073425/261778/261778_original.gif)

ный центр для сохранения и демонстрации его богатого наследия, в том числе Чинубхаем Чиманлалом Сетом, первым мэром Ахмадабада с июля 1950 г. по август 1956 г. Ле Корбюзье создал музей в характерном для него модернистском стиле: «Проект соответствует его теории „Музея неограниченного роста“, которая предполагает гибкий дизайн и спиралевидную форму с небольшим количеством несущих стен, что позволяет легко расширять галереи и стены» [11].

Во время проектирования и строительства данного здания Ле Корбюзье предложил назвать его Музеем знаний. Это было частью довольно амбициозного проекта под названием «Культурный центр Ахмадабада», в рамках которого нынешний комплекс был разделен на несколько павильонов, каждый из которых был посвящен определенному тематическому направлению – археологии, скульптуре, антропологии и истории, а также театрам под открытым небом для фольклорных представлений и мастерским. К сожалению, этот проект так и не был реализован, и Санскар Кендра – единственный музей, построенный в соответствии с первоначальным планом и являющийся единственным хранителем истории Ахмадабада [12].

Жаркий и засушливый климат представлял серьезную проблему, которую Ле Корбюзье решил с поразительной изобретательностью: «Здание стоит на сваях, что позволяет воздуху циркулировать под ним и таким образом охлаждать конструкцию. Система двойной крыши, состоящая из внешней бетонной оболочки и внутреннего кирпичного купола, защищает от палящего солнца и поддерживает более низкую температуру внутри» [13].

Ле Корбюзье делал акцент на пространстве, свете и зелени: «Его здания, казалось, не имели ничего общего с окружающей средой и индийским контекстом, и их часто называли чужеродными, но его проекты идеально сочетались с природой. Он внедрил современные способы циркуляции воздуха в своих зданиях, такие элементы защиты от солнца, как навесы от солнца, маркизы и изогнутые нависающие крыши, которые органично вписывались в фасад. Фасады были простыми, без украшений и полировки. Широкая полоса окон была предусмотрена для того, чтобы улавливать преобладающие ветры» [Там же].

«Центральным элементом музея служит внутренний двор с бассейном, откуда к выставочным залам ведет открытый пандус» [11].

Чтобы сделать здание более комфортным для местных жителей и туристов, где они могли бы укрыться от беспощадной городской жары, Ле Корбюзье предусмотрел оригинальные «системы охлаждения»: «К ним относятся различные участки с густой растительностью, системы защиты от солнца и жемчужина системы охлаждения – 45 бассейнов на крыше здания, каждый площадью 540 квадратных футов и глубиной 13 футов. Это обеспечивает интенсивное охлаждение здания. <...> Ле Корбюзье также уделил большое внимание освещению территории, на которой строился комплекс. <...> Естественное освещение гармонично сочетается с многочисленными системами затенения и водными узорами, создавая успокаивающую и притягательную прохладу, которая служит желанным спасением от изнуряющей городской жары» [12].

Идея Ле Корбюзье соответствовала его творческим принципам. Он проектировал здание кубической формы со сторонами по 50 м, поддерживаемое железобетонным пространственным каркасом. В верхней части каркаса размещены



выставочные залы, в нижней – общественное пространство. Самой характерной особенностью комплекса зданий Санскар Кендра, занимающего площадь около 2500 м<sup>2</sup>, являются цилиндрические опоры (пилоты) высотой 3,5 м. Зодчий предусмотрел возможность расширения этого здания до 84 м в каждую сторону. Это позволило бы увеличить выставочную площадь с 2500 до 7000 м<sup>2</sup>. В музее реализованы ключевые идеи Ле Корбюзье – свободная планировка, сетка опор-пилотов, пандус и сад на крыше, который был преобразован в навес, защищающий здание от солнца, дождя и жары. В крыше были предусмотрены световые люки, через которые солнечные лучи попадали в галереи. Б.В. Доши однажды сказал: «Ле Корбюзье умел создавать мягкий свет, от которого лица людей сияют» [3].

Чтобы попасть во внутренний двор, нужно пройти через общественную зону. Пандус ведет на верхний этаж и в просторный главный зал: «Мы поднимаемся наверх по квадратному спиральному нефу, состоящему из двух пролетов по семь метров между опорами, расположенными на расстоянии семи метров друг от друга: общая длина составляет четырнадцать метров» [11].

Планировка музея гармонично вписана в квадратную сетку. Внутренние пространства сгруппированы вокруг центрального двора, который служит источником естественного освещения и вентиляции: «Открытая планировка позволяет гибко использовать выставочные площади, обеспечивая динамичное и интерактивное взаимодействие с посетителями» [13].

В схему квадратного плана здания (как и у построенного Ле Корбюзье примерно в этот же период Музея западного искусства в Токио, 1959 г.) заложена прямоугольная спираль. Она позволяла при развитии коллекции расширять план во все стороны добавлением новых витков: «Эта спираль экспозиционных объемов поднята над землей на столбах, оставляя место для сада с бассейном и обслуживающих помещений. Над экспозициями в Ахмадабаде как бы “парит” крыша-зонтик, на которой устроен сад – дополнительная защита микроклимата» [2] (рис. 20, 21).

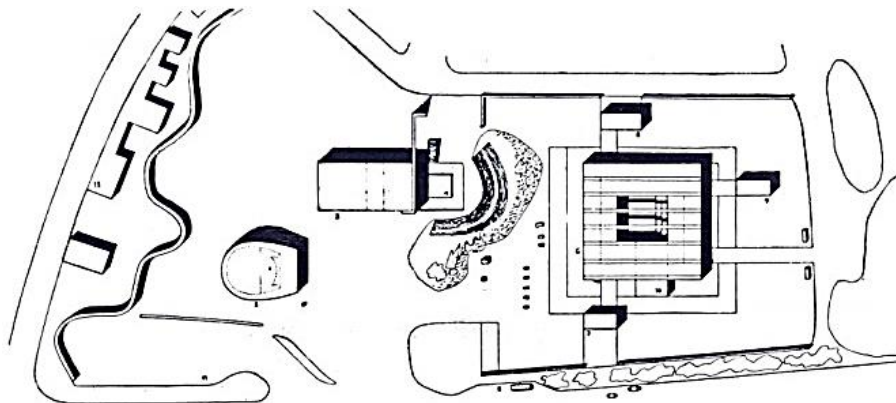


Рис. 20. Генеральный план музея Санскар Кендра<sup>25</sup>

Fig. 20. Master plan of the Sanskar Kendra Museum

<sup>25</sup> URL: <https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2024/06/Sanskar-Kendra-City-Museum-by-Le-Corbusier-Ahmedabad-11.jpg?ssl=1>

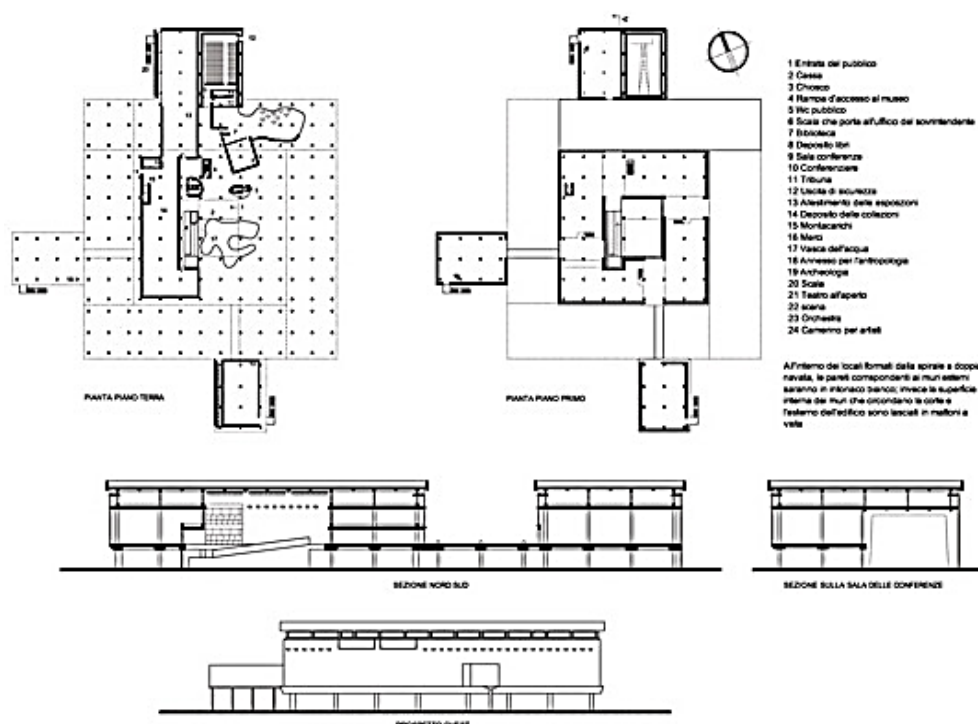


Рис. 21. Чертежи музея Санскар Кендра<sup>26</sup>  
Fig. 21. Drafts of the Sanskar Kendra Museum

Красота здания заключается в его простоте. Фасады музея облицованы красным кирпичом, имеют правильные пропорции, лишены вычурности и помпезности: «Ле Корбюзье использовал местные материалы, в том числе кирпич и бетон, чтобы создать конструкцию, которая перекликается с традиционной архитектурой региона. Грубые, необработанные поверхности бетонных стен придают зданию естественную красоту, а кирпичная кладка добавляет дизайну теплоты и фактурности...» [12] (рис. 22).

Помимо функциональных и эстетических аспектов, городской музей Санскар Кендра воплощает в себе глубокий культурный символизм: «Центральный двор, напоминающий традиционные индийские *хавели* (араб. перегородка, личное пространство), был популярен еще в империи Великих Моголов (средневековая застройка Дели и Агры, XVI–XIX вв.). Он способствовал формированию чувства социальной общности и единения. Здесь также присутствуют элементы индийской архитектуры, такие как *джали* (перфорированные ширмы), которые обеспечивают тень и уединение, пропуская при этом воздух и свет» [13] (рис. 23).

Внутренний двор украшают фонтан и скульптуры, выполненные в древнеиндийских традициях (рис. 24).

<sup>26</sup> URL: <https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2024/06/Sanskar-Kendra-City-Museum-by-Le-Corbusier-Ahmedabad-12.jpg?ssl=1>



Рис. 22. Городской музей Санскар Кендра в Ахмадабаде. Видовые точки<sup>27</sup>  
 Fig. 22. Sankara Kendra Municipal Museum in Ahmedabad

На протяжении десятилетий музей Санскар Кендра сталкивался с проблемами, связанными с его техническим обслуживанием и сохранением. Были предприняты усилия по восстановлению этого здания. В музее хранятся не только артефакты, рассказывающие об истории и культуре Ахмадабада, но и свидетельства непреходящего наследия Ле Корбюзье. Музей Санскар Кендра – это не просто здание, это символ слияния модернистских идеалов с традиционными индийскими ценностями. Благодаря дальновидному проекту Ле Корбюзье получилось функциональное и в то же время поэтичное пространство, образец современной архитектуры, который продолжает очаровывать и вдохновлять [13].

<sup>27</sup> URL: <https://i0.wp.com/archeyes.com/wp-content/uploads/2024/06/Sanskar-Kendra-City-Museum-by-Le-Corbusier-Ahmedabad-12.jpg?ssl=1>





Рис. 23. Внутренний двор музея Санскар Кендра. Видовая точка<sup>28</sup>  
Fig. 23. The courtyard of the Sanskar Kendra Museum



Рис. 24. Санскар Кендра:  
а – интерьер Музея воздушных змеев; б – фонтан<sup>29</sup>  
Fig. 24. Sanskar Kendra:  
а – interior of the Museum of Snakes; b – fountain

<sup>28</sup> URL: <https://archeyes.com/sanskar-kendra-city-museum-by-le-corbusier/>

<sup>29</sup> URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sanskar\\_Kendra#/media/File:Kite\\_Museum\\_Ahmedabad.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Sanskar_Kendra#/media/File:Kite_Museum_Ahmedabad.JPG)

Таким образом, рассмотренные здесь проекты Ле Корбюзье в Ахмадабаде можно считать уникальным примером воплощения его творческих концепций, сочетающих функциональность, эстетику и единство с природой. В данных постройках он успешно апробировал свои пять принципов модернистской архитектуры и сумел защитить строения от чрезмерной инсоляции. Полученный опыт Шарль-Эдуард успешно реализовал в Капитолии – административном центре г. Чандигарх (штат Пенджаб), которому будут посвящены наши дальнейшие публикации.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Поляков Е.Н., Полякова О.П. Индийский этап в творчестве Ле Корбюзье. Проект города Чандигарх (1950–1960 гг.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 3. С. 63–78.
2. *Le Corbusier and India: Osmosis* // Kazi Khaleed Ashraf Writings : [сайт]. 1988. URL: <https://kaziashraf.com/writings/featured-articles/le-corbusier-and-india-an-osmosis/> (дата обращения: 21.03.2025).
3. *How Le Corbusier Changed the History of Architecture in India* // RTF : [сайт]. URL: <https://www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a3504-how-le-corbusier-changed-the-history-of-architecture-in-india/> (дата обращения: 22.03.2025).
4. *Le Corbusier. D Classics: The Mill Owners Association Building* // ArchDaily : сайт <https://www.archdaily.com/464142/ad-classics-mill-owners-association-building-le-corbusier> (дата обращения: 22.03.2025).
5. *What Le Corbusier designed for the mill owners in Ahmedabad* // Paper Planes : [сайт]. 2019. URL: <https://www.joinpaperplanes.com/le-corbusier-designed-ahmedabad-mill-owners/> (дата обращения: 11.02.2025).
6. Curtis William J.R. *Le Corbusier Ideas and Forms*. China : Phaidon Press Ltd, 2001. 240 p.
7. *Villa Shodhan: a harmonious combination of Le Corbusier's functionality and aesthetics* // ArchEyes : [сайт]. 2023. URL: <https://archeyes.com/villa-shodhan-le-corbusiers-harmonious-blend-of-function-and-aesthetics/> (дата обращения: 17.02.2025).
8. Serenyi P. Abstracts of Papers Presented at the Twenty-Third Annual Meeting of the Society of Architectural Historians: Classicism and Anti-Classicism in Le Corbusier's Architecture // Journal of the Society of Architectural Historians. V. 29. № 3. P. 273–274.
9. *Living in a Cube: Corbusier designed some of Ahmedabad's most iconic buildings* // The Indian EXPRESS : [сайт]. 2015. URL: <https://indianexpress.com/article/lifestyle-le/lifestyle/living-in-a-cube-corbusier-designed-some-of-ahmedabads-most-iconic-buildings/> (дата обращения: 15.02.2025).
10. *Villa Sarabhai: Le Corbusier's Modernist Vision Rooted in Indian Tradition* // ArchEyes : [сайт]. 2024. URL: <https://archeyes.com/villa-sarabhai-le-corbusiers-modernist-vision-rooted-in-indian-tradition/> (дата обращения: 25.02.2025).
11. *Sanskar Kendra. Ahmedabad* // Rethinking The Future : [сайт]. URL: <https://www.re-thinkingthefuture.com/case-studies/a12531-sanskar-kendra-ahmedabad/> (дата обращения: 25.02.2025).
12. *Sanskar Kendra. City Museum Ahmedabad (Entry Fee, Timings, History, Images, Location & Entry ticket cost price)* // Ahmedabad tourism : [сайт]. 2025. URL: <https://ahmedabadtourism.in/sanskar-kendra-city-museum-ahmedabad> (дата обращения: 27.02.2025).
13. *Sanskar Kendra. City Museum by Le Corbusier* // ArchEyes : [сайт]. 2024. URL: <https://archeyes.com/sanskar-kendra-city-museum-by-le-corbusier/> (дата обращения: 27.02.2025).

#### REFERENCES

1. Polyakov E.N., Polyakova O.P. Religious Buildings in the Architectural Heritage of Le Corbusier. La Tourette Monastery in Lyon (1953–1960). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (3): 63–78. (In Russian)

2. Le Corbusier and India: Osmosis. Available: <https://kaziashraf.com/writings/featured-articles/le-corbusier-and-india-an-osmosis/> (accessed March 21, 2025).
3. How Le Corbusier changed the history of architecture in India. Available: [www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a3504-how-le-corbusier-changed-the-history-of-architecture-in-india/](http://www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a3504-how-le-corbusier-changed-the-history-of-architecture-in-india/) (accessed March 21, 2025).
4. Le Corbusier D Classics: The Mill Owners Association Building. Available: [www.archdaily.com/464142/ad-classics-mill-owners-association-building-le-corbusier/](http://www.archdaily.com/464142/ad-classics-mill-owners-association-building-le-corbusier/) (accessed March 21, 2025).
5. What Le Corbusier designed for the mill owners in Ahmedabad. Available: [www.joinpaperplanes.com/le-corbusier-designed-ahmedabad-mill-owners/](http://www.joinpaperplanes.com/le-corbusier-designed-ahmedabad-mill-owners/) (accessed February 11, 2025).
6. Curtis William J.R. Le Corbusier Ideas and Forms. China: Phaidon Press Ltd, 2001. 240 p.
7. Villa Shodhan. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Villa\\_Shodhan?ysclid=mc64r8n179541853481](https://en.wikipedia.org/wiki/Villa_Shodhan?ysclid=mc64r8n179541853481)
8. Serenyi P. Abstracts of Papers Presented at the Twenty-Third Annual Meeting of the Society of Architectural Historians: Classicism and Anti-Classicism in Le Corbusier's Architecture. *Journal of the Society of Architectural Historians*. 29 (3): 273–274.
9. Living in a Cube: Corbusier designed some of Ahmedabad's most iconic buildings. Available: <https://indianexpress.com/article/lifestyle/life-style/living-in-a-cube-corbusier-designed-some-of-ahmedabads-most-iconic-buildings/> (accessed February 15, 2025).
10. Villa Sarabhai: Le Corbusier's modernist vision rooted in Indian tradition. Available: <https://archeyes.com/villa-sarabhai-le-corbusiers-modernist-vision-rooted-in-indian-tradition/> (accessed February 25, 2025).
11. Sanskar Kendra. City Museum Ahmedabad. Available: [www.re-thinkingthefuture.com/case-studies/a12531-sanskar-kendra-ahmedabad/](http://www.re-thinkingthefuture.com/case-studies/a12531-sanskar-kendra-ahmedabad/) (accessed February 27, 2025).
12. Sanskar Kendra. City Museum by Le Corbusier. Available: <https://ahmedabadtourism.in/sanskar-kendra-city-museum-ahmedabad>
13. Le Corbusier's Sanskar Kendra City Museum. Available: <https://archeyes.com/sanskar-kendra-city-museum-by-le-corbusier/> (accessed February 27, 2025).

#### Сведения об авторах

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

Полякова Ольга Павловна, канд. экон. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [orpopp2010@yandex.ru](mailto:orpopp2010@yandex.ru)

#### Authors Details

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

Olga P. Polyakova, PhD, A/ Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, 2, Russia, [orpopp2010@yandex.ru](mailto:orpopp2010@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 03.09.2025  
Одобрена после рецензирования 09.09.2025  
Принята к публикации 10.09.2025

Submitted for publication 03.09.2025  
Approved after review 09.09.2025  
Accepted for publication 10.09.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 88–100.

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 (5): 88–100.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-88-100

EDN: HFAQXJ

# ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА АРХИТЕКТУРНУЮ ТИПОЛОГИЮ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ДЛЯ СПОРТСМЕНОВ

Ольга Владимировна Киселева

*Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена отсутствием системных разработок по объектам, обеспечивающим качество и результативность российского спорта, которыми выступают медико-восстановительные и реабилитационные центры для спортсменов. Для создания научно обоснованной типологии и построения архитектурно-типологических моделей спортивных реабилитационных центров предлагается комплекс факторов, которые могут оказывать влияние на формирование архитектурно-планировочной структуры исследуемых объектов. На втором этапе исследования проанализированы взаимозависимости данных факторов, способствующие формированию приоритетных и уникальных архитектурно-типологических моделей центров реабилитации для спортсменов.

**Цель** работы заключается в выявлении комплекса факторов, влияющих на архитектурно-планировочную организацию центров реабилитации для спортсменов, путем систематизации архитектурных и внеархитектурных аспектов проектирования.

**Методика** исследования основана на комплексном подходе к выявлению факторов формирования архитектурной типологии медико-восстановительных и реабилитационных центров для спортсменов. Использован метод классификации для систематизации внешних и внутренних факторов и выявления взаимосвязей между ними.

**Границы** исследования определяются архитектурно-типологическими аспектами рассмотрения проблемы формирования реабилитационных центров для спортсменов.

**Научная новизна** заключается в авторской трактовке комплекса архитектурных и внеархитектурных факторов, влияющих на формирование относительно нового и малоизученного архитектурно-типологического объекта – медико-восстановительных и реабилитационных центров для спортсменов.

**Практическая значимость.** Результаты могут быть использованы на всех этапах разработки архитектурной концепции спортивных реабилитационных центров.

**Результаты** исследования. На основании изучения и анализа теоретической базы по теме исследования выявлены внеархитектурные и архитектурные факторы, которые оказывают влияние на формирование архитектурной типологии и планировочной организации центров реабилитации спортсменов. Дальнейшее определение наиболее продуктивных вариантов взаимодействия данных факторов порождает многообразие типологических моделей исследуемых объектов.

**Ключевые слова:** реабилитационные центры для спортсменов, архитектурная типология, внешние и внутренние факторы, архитектурно-типологические модели

**Для цитирования:** Киселева О.В. Факторы, влияющие на архитектурную типологию реабилитационных центров для спортсменов // Вестник Томского

государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 88–100. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-88-100. EDN: HFAQXJ

## ORIGINAL ARTICLE

## FACTORS INFLUENCING THE ARCHITECTURAL TYPOLOGY OF REHABILITATION CENTERS FOR ATHLETES

Olga V. Kiseleva

*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

**Abstract.** The relevance of the study is due to the lack of systematic development of facilities that ensure the quality and effectiveness of Russian sports, which are medical rehabilitation centers for athletes. To create a scientifically based typology and build architectural and typological models of rehabilitation centers, a set of factors is proposed that influence the formation of their architectural and planning structure. The dependence of these factors from each other is analyzed, which contribute to the formation of priority and unique architectural and typological models of rehabilitation centers for athletes.

**Purpose:** The aim of the work is to identify factors influencing the architectural and planning organization of rehabilitation centers for athletes by systematizing architectural and non-architectural aspects of design.

**Methodology:** The integrated approach to identifying the formation of architectural typology of medical rehabilitation centers for athletes. Classification is used to systematize external and internal factors and identify relationships between them.

**Research findings:** The identified non-architectural and architectural factors influence the formation of the architectural typology and planning organization of rehabilitation centers. Further identification of the most productive options for the interaction of these factors generates a variety of typological models of centers.

**Practical implications:** The results can be used at all development stages of the architectural concept of sports rehabilitation centers.

**Value:** Interpretation of architectural and non-architectural factors influencing the formation of a relatively new and little studied architectural and typological facility, i.e., medical rehabilitation centers for athletes.

**Keywords:** rehabilitation center, architectural typology, external and internal factors, architectural and typological models

**For citation:** Kiseleva O.V. Factors Influencing the Architectural Typology of Rehabilitation Centers for Athletes. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 88–100. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-88-100. EDN: HFAQXJ

## Введение

В современном мире происходит активная популяризация физической культуры и спорта, что подтверждается распоряжением Правительства Российской Федерации от 24.11.2020 № 3081-р «Об утверждении стратегии развития физической культуры и спорта в Российской Федерации на период до 2030 года». Одним из направлений стратегии является развитие медико-спортивной инфраструктуры с созданием инновационной системы медицинского обеспечения, которое делает актуальными задачи появления реабилитационных центров (далее РЦ) для травмированных спортсменов.

Проектирование современных РЦ для спортсменов должно характеризоваться высокой архитектурно-планировочной структурой и соответствовать со-

временным стандартам медицинской науки. Пространство РЦ должно обладать возможностями приспособления к потребностям реабилитируемых пациентов, а также к условиям функционально-технологического процесса реабилитации с целью достижения оптимального соответствия этого пространства физическим, психологическим и эмоциональным потребностям пациента. Формирование такого рода учреждений является насущной проблемой здравоохранения, т. к. с точки зрения архитектурной типологии данные объекты являются относительно новыми и малоизученными, что подчеркивает актуальность исследования.

Также существует проблема проектирования комплексных РЦ, которая обсуждалась на научно-практической конференции с международным участием «СПОРТМЕДФОРУМ-2024» и стала ключевым научным событием в области травматологии, спортивной медицины и реабилитации. Обсуждалась необходимость создания архитектурно-планировочных решений комплексных РЦ, которые будут способствовать физической и психологической помощи спортсменам, учитывая специфику полученных ими травм в различных видах спорта.

В дополнение к этому, в соответствии со СНиП 2.07.01-89 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», близкие по профилю оздоровительные учреждения следует объединять в единое архитектурно-пространственное решение (комплексы), обеспечивая централизацию медицинского, культурно-бытового и хозяйственного обслуживания.

Существующие современные РЦ по своему функциональному и архитектурно-пространственному решению не всегда обеспечивают комплексный подход к восстановлению физического и психологического здоровья спортсменов, что требует разработки актуальных моделей и методических предложений по формированию архитектуры комплексных РЦ для спортсменов.

По статистическим данным спортивного травматизма, наблюдается дефицит объектов спортивной медицины и реабилитации, о чем свидетельствуют данные, представленные Всемирной организацией здравоохранения на Всемирном докладе об инвалидности. К тому же проведенный анализ опыта проектирования и строительства медицинских учреждений с функциями реабилитации показал, что реабилитация спортсменов после травм происходит в основном либо в организациях узкоспециализированного характера, либо в многопрофильных больницах, где имеются лишь небольшие отделения спортивной медицины [1].

Анализ теоретической базы по теме исследования показывает, что вопросы архитектурного проектирования центров реабилитации для инвалидов (включая спортсменов) уже получили значительное внимание в научной литературе. Однако тема архитектурного формирования РЦ для спортсменов с учетом различных видов спорта и специфики полученных ими травм специально не рассматривалась и не изучалась, что обуславливает научную новизну настоящего исследования.

Большой вклад в изучение особенностей проектирования РЦ внесли следующие работы: К.В. Абрамовой, Е.П. Авраменко, Д.А. Протопоповой по анализу современных тенденций проектирования и строительства лечебно-реабилитационных центров [2, 3, 4]; Н.О. Федорченко, В.А. Пармаксыз, Д.К. Подковыровой по изучению особенностей проектирования РЦ для людей с патологией опорно-двигательного аппарата, включая спортсменов [5, 6, 7].



Также большое внимание в российской науке уделяется вопросам архитектурного формирования РЦ для детей и онкобольных. Исследования А.Р. Гайдук и Д.С. Варфоломеевой посвящены определению принципов формирования детских клиничко-реабилитационных онкологических центров и РЦ для детей и подростков с ДЦП [8, 9]. Вопросы типологии медицинских учреждений исследованы в трудах А.Р. Гайдук, Л.Ф. Закиевой, однако осмысление типологических особенностей РЦ для спортсменов находятся на стадии становления [10, 11].

### Основная часть

Для создания научно обоснованной типологии РЦ для спортсменов необходимо выявить факторы, которые влияют на формирование архитектурно-планировочной структуры исследуемых объектов. Благодаря использованию системного подхода можно учесть все требования для создания функционально-грамотной реабилитационной среды.

В результате исследования специфики архитектурно-планировочной организации спортивных медико-восстановительных учреждений [12] можно определить различные архитектурные (внутренние) и внеархитектурные (внешние) аспекты рассматриваемой проблемы.

Внеархитектурные факторы являются внешними аспектами для архитектурной системы «реабилитационный центр для спортсменов», которые в дальнейшем будут вступать в конфликт с ее архитектурными факторами, создавая оболочку среды, в которой непосредственно происходит формирование внешних требований по отношению к проектированию РЦ для спортсменов (рис. 1).

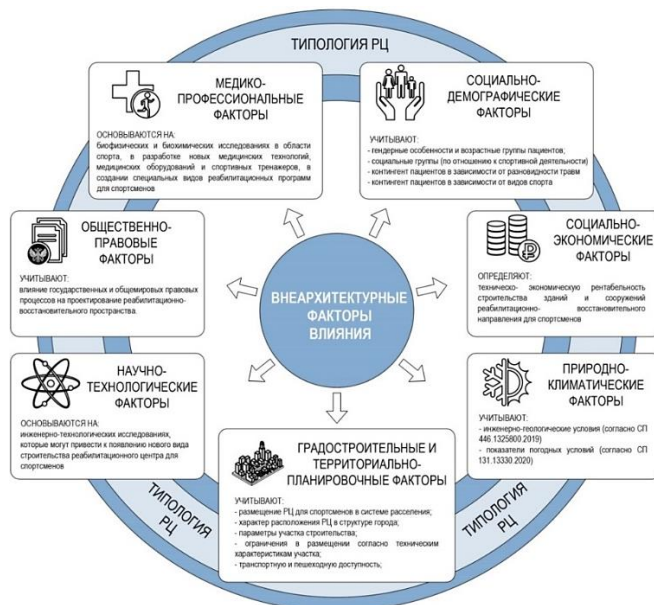


Рис. 1. Внеархитектурные факторы, влияющие на формирование архитектурной типологии реабилитационных центров для спортсменов

Fig. 1. External factors influencing the formation of architectural typology of rehabilitation centers for athletes

**1. Общественно-правовые факторы** – факторы, выраженные в государственной политике, направленной на развитие спорта и медицины. Они учитывают влияние государственных и общемировых правовых процессов на проектирование реабилитационно-восстановительного пространства.

В последнее время в связи с популяризацией спортивного движения в стране был принят ряд мер, направленных на поддержание и развитие спортивной и медико-реабилитационной сфер. К ним относятся и принятые правила, регламентирующие требования к архитектурно-планировочным решениям центров спортивной реабилитации. Данные документы отражают правовое регулирование медицинской, реабилитационной, спортивной и других видов деятельности, а также пути их совершенствования на государственном уровне.

**2. Социально-экономические факторы** – факторы, имеющие первостепенное социальное значение, они определяют технико-экономическую рентабельность строительства зданий и сооружений реабилитационно-восстановительного направления для спортсменов.

Данные факторы выявляют значимость спортивных РЦ в стране и ее регионах с социальной точки зрения, а также создают основные пути их становления и развития в различных экономических условиях.

Можно выделить основные показатели данного аспекта, которые характеризуют состояние экономики регионов, в которых планируется строительство исследуемого объекта: ВРП (валовой региональный продукт) на душу населения; валовое накопление на душу населения; индекс потребительских цен; уровень экономической активности населения; уровень безработицы; оборот розничной торговли.

**3. Социально-демографические факторы** определяют формирование типологических решений РЦ для спортсменов с ориентацией на требования основных групп пациентов. Данные аспекты отражают демографическую ситуацию в стране и в отдельных ее регионах. Сведения предоставляются Федеральной службой государственной статистики – Росстатом.

К социально-демографическим показателям относятся численность населения и его размещение по территории; возрастной, гендерный и национальный составы населения. Также данный аспект охватывает особенности разделения людей на социальные группы по уровню вовлеченности в спортивную деятельность, определяет контингент реабилитируемых спортсменов в зависимости от видов спорта и разновидности полученных ими травм.

Социально-демографические факторы могут влиять на решение таких задач, как определение состава основных функциональных зон РЦ; выбор типов реабилитационных программ; расчет необходимой вместимости РЦ; определение востребованности в создании общедоступной среды; размещение в составе РЦ альтернативных функций и т. д.

**4. Природно-климатические факторы** – факторы влияния географических особенностей на архитектурно-планировочные решения. Данные факторы включают в себя природные и климатические особенности, взаимосвязь которых оказывает значительное влияние на формообразование, выбор конструктивных решений и внешний облик РЦ.

К *природным* особенностям относятся: инженерно-геологические условия (СП 446.1325800.2019), включающие сведения о характере рельефа, гео-

морфологических особенностях, геологическом строении, гидрогеологических условиях, геологических и инженерно-геологических процессах, сейсмичности, физико-механических свойствах грунтов, составе подземных вод и техногенных воздействиях.

*Климатические* особенности определяются согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» и включают в себя показатели погодных условий: солнечная радиация, ветровые потоки; температурные характеристики воздушных масс, водоемов, почвы; влажность воздуха; атмосферные осадки.

**5. Градостроительные и территориально-планировочные факторы** – факторы, влияющие на местоположение РЦ для спортсменов, представляющие совокупность условий для их размещения.

Градостроительные факторы влияют на вид градостроительного размещения РЦ:

- в системе расселения: в структуре малых населенных пунктов; в структуре населенных пунктов до 500 тыс. жителей; в структуре крупнейших городов (1 млн и более);

- в структуре города: в центральном планировочном районе; в исторической части города (с выявлением градостроительной роли и композиции объекта); в рядовой застройке (в плотной структуре кварталов); на периферии города.

Территориально-планировочные факторы учитывают особенности соответствующих территорий для размещения РЦ, особенности и технические ограничения участка строительства.

Немаловажным является и определение необходимого уровня транспортной и пешеходной доступности РЦ. Выделяется четыре основных уровня доступности для спортивных или медицинских организаций, в состав которых могут входить отделения спортивной реабилитации, или же для отдельных специализированных центров реабилитации спортсменов в соответствии со ступенчатой системой обслуживания:

I уровень – микрорайонный. Как правило, представлены частными кабинетами спортивной травматологии в пределах 5-минутной пешеходной доступности и рассчитаны на ежедневное использование.

II уровень – районный. Размещение отделений спортивной медицины в составе медицинских центров, обслуживающих несколько микрорайонов, рассчитаны на 30-минутную пешеходную доступность.

III уровень – общегородской. Предполагает размещение общегородских, узкоспециализированных или многофункциональных РЦ в пределах 30-минутной транспортной доступности.

IV уровень – областной (федеральный). Предполагает размещение загородных специализированных и многофункциональных медико-восстановительных комплексов для использования жителями всей области, в которой расположен объект, а также приезжими из других субъектов страны. Транспортная доступность составляет свыше 30 мин.

**6. Научно-технологические факторы** определяют влияние инженерно-технологических исследований, которые могут привести к появлению новых технологий и видов строительства, инженерных систем для спортивных РЦ. Сюда входят инженерно-технологические исследования в сфере внедрения но-

вых конструктивных решений для формирования многофункционального пространства РЦ, изобретение новых строительных и отделочных материалов, инженерного обеспечения медико-восстановительных процедур, применение новых методов строительства и эксплуатации спортивных объектов и объектов здравоохранения.

**7. Медико-профессиональные факторы** – группа факторов, которые появляются в результате взаимодействия прогрессивных научных идей и методов в сфере реабилитации спортсменов. Данные аспекты проявляются в биофизических и биохимических исследованиях в области спорта, в разработке новых медицинских технологий, медицинского оборудования и спортивных тренажеров, в создании специальных видов реабилитационных программ для спортсменов со своей спецификой травматизма.

Учет данных факторов позволяет разработать новые специальные пространства для лечения и реабилитации с использованием новейших технологий.

Архитектурные факторы рассматриваемой проблемы являются внутренними аспектами архитектурной системы «реабилитационный центр» и связаны непосредственно с построением самого объекта (рис. 2).

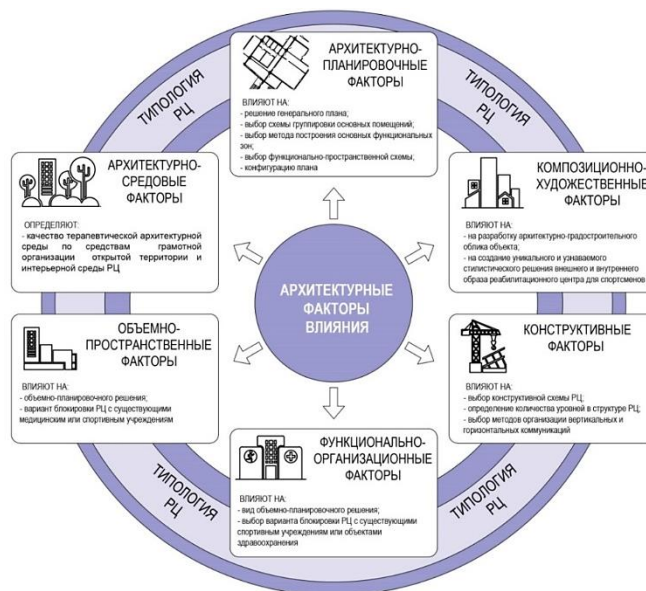


Рис. 2. Архитектурные факторы, влияющие на формирование архитектурной типологии реабилитационных центров для спортсменов

Fig. 2. Internal factors influencing the formation of architectural typology of rehabilitation centers for athletes

**1. Архитектурно-планировочные факторы** – определяются особенностями и спецификой организации основных групп помещений и блоков РЦ; это коммуникации между ними и связи здания с внешней архитектурной средой.

Данные факторы представляют собой совокупность аспектов, влияющих на удобство и компактность размещения основных и технических групп помещений в зависимости от технологии и задач реабилитационного процесса.

Архитектурно-планировочные факторы преимущественно влияют на следующие аспекты:

- эффективную организацию и решение генерального плана в зависимости от размещения объекта в планировочной структуре: учет освещения, расположение прогулочных зон (озеленение территории); организация проездов, парковок и технических площадок и т. д.;
- выбор схемы группировки помещений: коридорная, ячейковая, анфиладная, зальная, павильонная, комбинированная;
- выбор метода построения основных функциональных зон: четкое разделение или гибкое пространство;
- выбор функционально-пространственной схемы: центрическая, линейная, разветвленная, многоветвевая, многополярная, дисперсная, дискретная;
- определение конфигурации плана: прямоугольная, п-образная, г-образная, с внутренними дворами.

**2. Объемно-пространственные факторы** – факторы, влияющие на объемно-пространственную организацию и на вид объемно-планировочного решения РЦ: единый объем, несколько рассредоточенных объемов, протяженное решение объема, компактное решение объема.

При проектировании РЦ для спортсменов часто используется принцип кооперации исследуемых объектов с медицинскими или спортивными сооружениями. Тогда могут быть предложены варианты блокировки РЦ: расположение встроенное, пристроенное, интегрированное, скооперированное на единой территории, отдельно стоящее здание.

**3. Конструктивные факторы** – факторы, непосредственно влияющие на выбор грамотного конструктивного решения РЦ для спортсменов, которое в большей степени зависит от влияния природно-климатических (внеархитектурных) факторов.

Конструктивные факторы преимущественно влияют на следующие аспекты:

- выбор конструктивной схемы: блочная (быстровозводимая), каркасная (металлический каркас), каркасная (ж/б каркас), стеновая;
- определение количества уровней в структуре РЦ: плоскостная планировочная структура (1–2 уровня), объемная планировочная структура (3 и более уровней);
- выбор метода организации вертикальных (лифт/лестница) и горизонтальных (коридоры, крупные распределительные пространства, проходные комнаты, открытые распределительные пространства) коммуникаций.

**4. Функционально-организационные факторы** – факторы, влияние которых распространяется на обеспечение и оптимизацию всех функциональных процессов, предполагаемых в здании/зданиях РЦ для спортсменов. Исходя из изучения специфики реабилитационного и восстановительного лечения травмированных спортсменов, может быть сформирован состав основных функциональных блоков и основных помещений исследуемых объектов.

Данные факторы также определяются возможными особенностями и спецификой функционирования объектов спортивного и медицинского назначения, которые могут быть скооперированы с центрами спортивной реабилитации. В состав РЦ могут входить спортивные сооружения, которые разделятся

по виду/отсутствию ограждающих конструкций, сезонности видов спорта, специализации и назначению.

РЦ спортивной направленности также могут входить в состав учреждений здравоохранения, таких как городские поликлиники, многопрофильные городские больницы, университетские клиники, специализированные больницы, медицинские кластеры/районы.

**5. Композиционно-художественные факторы** – факторы, которые влияют на разработку архитектурно-градостроительного облика объекта, а также на создание уникального и узнаваемого стилистического решения внешнего и внутреннего образа РЦ для спортсменов.

Практическое выражение композиционно-художественных факторов проявляется в применении планировочной и объемно-пространственной композиций в качестве основного художественно-декоративного приема, в выборе решения архитектурного образа фасада в зависимости от функции объекта, в учете контекста окружающей застройки для ее применения в создании единого образа в городской застройке или же для создания собственного стилистического решения.

**6. Архитектурно-средовые факторы** – факторы, которые определяют качество терапевтической архитектурной среды, способствующей быстрому выздоровлению спортсменов. Они связаны со следующими аспектами:

- организацией открытой среды больничной территории с учетом ее зонирования, удобства пешеходных связей, благоустройства и доступности среды для МГН;
- качественной системой визуальных коммуникаций и информационной среды;
- организацией терапевтических архитектурно-ландшафтных зон и композиций;
- размещением оборудования, малых форм и тренажеров для реабилитации и выздоровления травмированных спортсменов;
- формированием интерьерной среды больничных корпусов РЦ и ее оформлением.

### Результаты исследования

Пересечения архитектурных (внутренних) и внеархитектурных (внешних) факторов, влияющих на формирование архитектурной типологии РЦ для спортсменов, порождают многообразие типологических моделей исследуемых объектов, которые представлены на рис. 3. Наиболее эффективными являются:

- пересечение *природно-климатических* и *архитектурно-планировочных* факторов; образуются различные виды архитектурно-пространственных моделей РЦ: центрическая, линейная, разветвленная, многополярная, дисперсная, дискретная, многоветвевая, комбинированная и др.; появляются модели, в основе которых лежат схемы группировки помещений: коридорная, ячейковая, анфиладная, зальная, павильонная, комбинированная и другие с возможностью четкого или гибкого метода построения основных функциональных зон;
- пересечение *природно-климатических* и *объемно-пространственных* факторов, которые создают основу для определения типа застройки для кон-



кретного климатического района и рельефа строительной площадки: закрытый (компактный), открытый (экстравертный), террасированный;

– пересечение *природно-климатических* и *конструктивных* факторов: его результаты дают основу для создания конструктивной модельной системы РЦ для спортсменов; при дополнительном влиянии *научно-технологического* фактора формируются новые архитектурно-типологические модели и конструктивные схемы: блочная, объемно-блочная, каркасная (металлический или ж/б каркас), стеновая, ствольная, оболочковая, комбинированная;

– пересечение *градостроительных, территориально-планировочных* и *объемно-пространственных* факторов; образуется многообразие моделей по типу размещения (встроенное, пристроенное, интегрированное, отдельно стоящее), а также объемно-пространной (компоновочной) структуре объекта: единый объем, несколько рассредоточенных объемов, протяженное, компактное решение объема;

– пересечение *градостроительных, территориально-планировочных* и *функционально-организационных* факторов, которые образуют архитектурно-типологические модели на основе кооперации РЦ с различными видами объектов здравоохранения и спортивных учреждений: компактная модель, блочно-связевая, линейная.

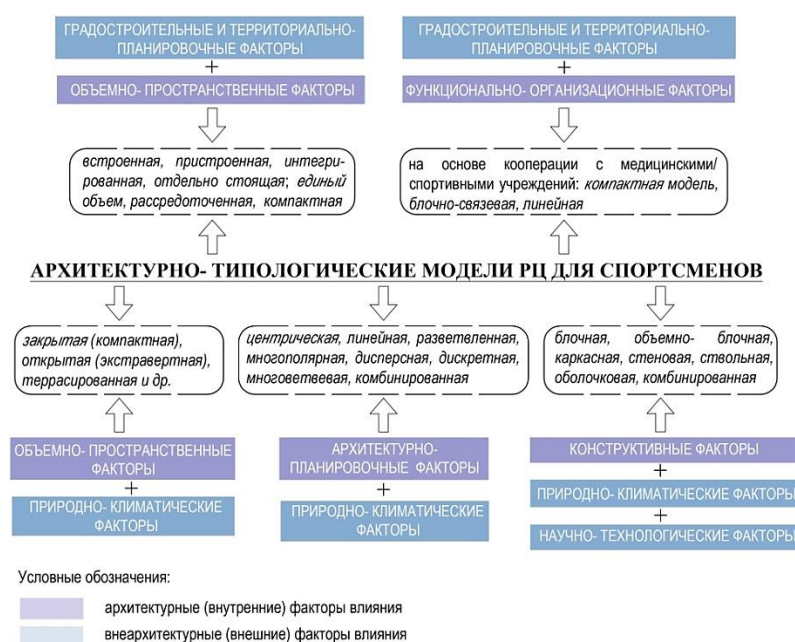


Рис. 3. Взаимодействия архитектурных и внеархитектурных факторов, влияющих на формирование архитектурно-типологических моделей РЦ для спортсменов

Fig. 3. Interaction between architectural and non-architectural factors influencing the formation of architectural and typological models of rehabilitation centers

Результат взаимодействия *социально-демографических* факторов с архитектурными оказывает максимальное влияние на формирование основных

функциональных блоков РЦ для спортсменов, их функциональную нагрузку и вместимость, что дает основу для создания архитектурно-типологических моделей исследуемых объектов.

Дальнейшее исследование и оценка всего комплекса действующих факторов может расширить возможную область модельных вариаций. Таким образом, путем выявления многофакторного взаимодействия могут быть выделены наиболее продуктивные взаимозависимые варианты архитектурных и внеархитектурных факторов. Это дает основу для создания уникальных архитектурно-типологических моделей РЦ для спортсменов.

### Выводы

1. В ходе исследования теоретической базы установлено, что архитектура медико-восстановительных и реабилитационных центров для травмированных спортсменов является малоизученным аспектом, отсутствуют типологические разработки в данной области.

2. На построение типологии спортивных РЦ оказывают влияние внеархитектурные (общественно-правовые, социально-экономические, социально-демографические, природно-климатические, градостроительные и территориально-планировочные, научно-технологические, медико-профессиональные) и архитектурные (архитектурно-планировочные, объемно-пространственные, конструктивные, функционально-организационные, композиционно-художественные и архитектурно-средовые) факторы.

3. Выявление многофакторного взаимодействия комплекса факторов, влияющих на архитектуру РЦ, показало, что наибольшее количество архитектурно-типологических моделей данных объектов образуется при пересечении: а) природно-климатических с архитектурно-планировочными, объемно-пространственными, конструктивными и научно-технологическими факторами; б) градостроительных и территориально-планировочных с объемно-пространственными и функционально-организационными факторами; в) социально-демографических с архитектурно-планировочными и функционально-организационными факторами.

4. Дальнейшим направлением исследований выступает детальная разработка и описание архитектурной типологии и принципов формирования архитектуры РЦ для спортсменов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киселева О.В., Скопинцев А.В. Подходы к формированию архитектурной среды центров спортивной медицины и реабилитации // Инженерный вестник Дона. 2024. № 4 (112). EDN: HGRBOC
2. Абрамова К.В. Тенденции в строительстве современных лечебно-реабилитационных центров // Инновационная наука. 2024. № 6-1. С. 215–220. EDN: HPMHMC
3. Авраменко Е.П. Анализ современных тенденций проектирования реабилитационных центров // Архитектоника региональной культуры : сборник научных трудов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Курск, 27 октября 2022 г. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 7–11. EDN: VIUQTE
4. Протопопова Д.А. Современные тенденции проектирования лечебно-реабилитационных центров // Молодой исследователь Дона. 2023. № 2 (41). С. 62–66. EDN: CQVIYP

5. Федорченко Н.О. Особенности проектирования реабилитационных центров на примере проектов России и зарубежья // Молодежь и системная модернизация страны : сборник научных статей 4-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Курск, 21–22 мая 2019 г. Том 4. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 348–352. EDN: XROWQG
6. Пармаксыз В.А. Особенности проектирования реабилитационно-спортивных центров // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 77-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2021 год, Краснодар, 01 марта 2022 г. В 3 частях. Часть 1. Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. С. 286–289. EDN: SDWEVJ
7. Подковырова Д.К. Особенности проектирования реабилитационных центров для людей с патологией опорно-двигательного аппарата // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых 2019 : сборник научных статей 8-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 13–14 ноября 2019 г. Том 4. Курск : Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2019. С. 242–245. EDN: NWSTYE
8. Гайдук А.Р. Архитектурные принципы формирования клинко-реабилитационных центров для онкологически больных детей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (32). С. 64–70. EDN: UGMYBB
9. Варфоломеева Д.С. Принципы формирования реабилитационных центров для детей и подростков с ДЦП // Ползуновский альманах. 2019. № 1. С. 21–24. EDN: QEPAMT
10. Гайдук А.Р. Новая типология медицинских учреждений // Молодой ученый. 2011. № 3 (26). Т. 2. С. 212–216. EDN: NUEHHX
11. Закиева Л.Ф. Типология современных медицинских учреждений // Медицина и здравоохранение : материалы VII Международной научной конференции, г. Краснодар, январь 2019 г. Краснодар : Новация, 2019. С. 42–47. EDN: YWCPVB
12. Киселева О.В. Специфика архитектурно-планировочной организации учреждений для реабилитации спортсменов // Инженерный вестник Дона. 2024. № 12 (120). С. 525–531. EDN: QSIGSQ

## REFERENCES

1. Kiseleva O.V., Skopincev A.V. Approaches to the Formation of Architectural Environment of Sports Medicine and Rehabilitation Centers. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2024; 4 (112). EDN: HGRBOC (In Russian)
2. Abramova K.V. Construction Trends in Modern Rehabilitation Centers. *Innovacionnaja nauka*. 2024; (6-1): 215–220. EDN: HPMHMC (In Russian)
3. Avramenko E.P. Current trends in Design of Rehabilitation Centers. In: *Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. 'Architectonics of Regional Culture'*, October 27, Kursk, 2022. Pp. 7–11. EDN: BIUQTE (In Russian)
4. Protopopova D.A. Current Trends in Design of Rehabilitation Centers. *Molodoj issledovatel' Dona*. 2023; 2 (41): 62–66. EDN: CQVIYP (In Russian)
5. Fedorchenko N.O. Design of Rehabilitation Centers in Russia and Abroad. In: *Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. 'Youth and Systemic Modernization of the Country'*, May 21–22, Kursk. 2019. Pp. 348–352. EDN: XROWQG (In Russian)
6. Parmaksyz V.A. Design of Rehabilitation and Sports Centers. In: *Proc. 77th Sci. Conf. 'Scientific Support of Agro-Industrial Complex'*, in 3 vol., March 1, Krasnodar, 2022. Pp. 286–289. EDN: SDWEVJ (In Russian)
7. Podkovyrova D.K. Design of Rehabilitation Centers for People with Musculoskeletal Disorders. In: *Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. 'Generation of the Future: The View of Young Scientists-2019'*, Vol. 4, November 13–14, Kursk: Universitetskaya kniga, 2019. Pp. 242–245. EDN: NWSTYE (In Russian)
8. Gajduk A.R. Architecture of Clinical Rehabilitation Centers for Children with Cancer. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015; 2 (32): 64–70. EDN: UGMYBB (In Russian)
9. Varfolomeeva D.S. Principles of Formation of Rehabilitation Centers for Children and Adolescents with Cerebral Palsy. *Polzunovskij al'manah*. 2019; (1): 21–24. EDN: QEPAMT (In Russian)

10. Gajduk A.R. Factors Influencing the Formation of Spatial Planning Solutions for Clinical Rehabilitation Centers for Children with Cancer. *Molodoi uchenyi*. 2011; 2 (3 (26)): 212–216. EDN: NUEHHX (In Russian)
11. Zakieva L.F. Typology of Modern Medical Institutions. In: *Proc. 7th Int. Sci. Conf. 'Medicine and Healthcare'*, Krasnodar: Novatsiya. 2019. Pp. 42–47. EDN: YWCPVB (In Russian)
12. Kiseleva O.V. Architectural and Planning Structure of Rehabilitation Centers for Athletes. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2024; 12 (120): 525–531. EDN: QSIGSQ (In Russian)

#### Сведения об авторе

Киселева Ольга Владимировна, аспирант, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344082, г. Ростов-на-Дону, пр. Будёновский, 39, temereva\_olga@mail.ru

#### Author Details

Olga V. Kiseleva, Research Assistant, Southern Federal University, 39, Budennovskii Ave., 344082, Rostov-on-Don, Russia, temereva\_olga@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.03.2025  
Одобрена после рецензирования 17.09.2025  
Принята к публикации 18.09.2025

Submitted for publication 27.03.2025  
Approved after review 17.09.2025  
Accepted for publication 18.09.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 101–115.

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 (5): 101–115.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 364.122.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-101-115

EDN: JCYSVN

# ГЕНЕЗИС И РАЗВИТИЕ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ В ОМСКЕ И НОВОКУЗНЕЦКЕ

**Олеся Олеговна Смолина, Анна Владимировна Николаева**

*Новосибирский государственный*

*архитектурно-строительный университет (Сибстрин),*

*г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Анализируются два сибирских города – Омск и Новокузнецк – в хронологических границах 1917–2024 гг. на основе критериев устойчивого развития территории, совмещенных с интегральной типологией Б.С. Хорева, методикой оценивания качества городской среды, предложенной Минстроем.

**Цель работы:** провести комплексный анализ городов и определить факторы, способствующие или препятствующие их развитию.

**Методы.** Исследование базируется на теоретических аспектах изучения урбанизации в городах, проведен сравнительный, картографический и темпоральный анализы, использованы методы систематизации и структуризации. Проведен факториальный анализ развития изучаемых городов.

**Результаты.** Исследование выявило в Сибири тревожные тенденции, такие как депопуляция, нехватка квалифицированных кадров и ухудшение экологической ситуации. Важнейшие аспекты, необходимые для обеспечения комфортных условий жизни в городе, развиваются недостаточно быстро. Сохранение природного ландшафта препятствует реализации проектов по улучшению транспортной и экологической обстановки в соответствии с генеральными планами. Наиболее важными аспектами для создания комфортной городской среды являются безопасность, комфортность и экологичность.

Исследование процесса урбанизации и анализ качества городской среды в сибирских городах позволяют оценить результативность национальных проектов и выявить проблемные аспекты в развитии населенных пунктов. Полученные результаты могут оказать существенное воздействие на изменение подходов к развитию городов в России.

**Ключевые слова:** городская среда, типология городов, индекс качества среды, стратегии развития, территориальное развитие

**Для цитирования:** Смолина О.О., Николаева А.В. Генезис и развитие городской среды в исторической перспективе в Омске и Новокузнецке // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 101–115. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-101-115. EDN: JCYSVN

## ORIGINAL ARTICLE

## URBAN GENESIS AND DEVELOPMENT THROUGH HISTORY OF OMSK AND NOVOKUZNETSK

Olesya O. Smolina, Anna V. Nikolaeva

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

**Abstract. Purpose:** The paper analyzes two Siberian cities: Omsk and Novokuznetsk in the in the chronological period 1917-2024, based on the criteria for the territory sustainable development combined with the integral typology of B. S. Khorev, the methodology for assessing the quality of the urban environment proposed by the Ministry of Construction.

**Methodology:** Theoretical aspects of urbanization, comparative, cartographic and temporal analysis, and systematization and structuring methods; the factorial analysis of the development of the cities.

**Research findings:** Alarming trends in Siberia, such as depopulation, a shortage of qualified personnel, and a deteriorating environmental situation are identified herein. It is found that the most important aspects necessary for comfortable living conditions in the city are not rapidly developed. Preservation of the natural landscape hinders the implementation of projects on the improvement of transport and environmental conditions in accordance with master plans. The most important aspects for creating a comfortable urban environment are safety, comfort and environmental friendliness.

**Practical implications:** The study of the urbanization process and the analysis of the urban environment in Siberian cities make it possible to evaluate the effectiveness of national projects and identify problematic aspects in the development of settlements. The obtained results can have a significant impact on urban development in Russia.

**Keywords:** urban environment, urban typology, environmental quality index, development strategies, territorial development

**For citation:** Smolina O.O., Nikolaeva A.V. Urban Genesis and Development through History of Omsk and Novokuznetsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 101–115. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-101-115. EDN: JCYSVN

## Введение

В настоящем исследовании будут рассмотрены два населенных пункта – Омск и Новокузнецк – согласно критериям устойчивого развития, интегральной типологии Б.С. Хорева [1], методике Минстроя для вычисления индекса качества городской среды. Данные города находятся в Сибирском федеральном округе (СФО). Согласно сервису Statista [2], на 1 января 2024 г. СФО занимает 4-ю строчку среди округов по удельному весу городского населения – 75,1 %, также Омск оказался с низким рейтингом по индексу качества среды в группе городов-миллионников, а Новокузнецк занимает лидирующую 3-ю строчку среди крупных городов в Сибирском округе (данные приведены за 2023 г.) [3]. В целом показатели качества среды в Сибири характеризуются как неблагоприятные, т. к. по характеристикам города с населением менее 500 тыс. чел. имеют низкие оценки. В округе уже долгое время наблюдается депопуляция, что приводит к дефицитам кадров, низким показателям естественного прироста населения, началу пути к исчезновению поселений. В концепции стратегии про-



странственного развития РФ одними из главных задач являются: сокращение межрегиональной дифференциации, преодоление инфраструктурных ограничений и предотвращение дезурбанизации и высокой урбанизации в субъектах страны, т. е. равномерное расселение людей на территории России.

**Актуальность:** исследование процесса урбанизации позволяет выявить актуальные проблемы и определить стратегические приоритеты дальнейшего развития городских территорий. Это поспособствует разработке мер по оптимизации существующих концепций развития. Настоящее исследование значимо и актуально, оно базируется на анализе индекса качества городской среды и критериев устойчивого развития сибирских городов в ретроспективе.

**Новизна:** систематизация материалов исследования с проведением комплексного сравнительного анализа двух городов Сибири в исторической ретроспективе по параметрам устойчивого развития, методике Минстроя с выявлением ключевых положительных и отрицательных факторов, влияющих на темп развития. Данный анализ способен оказать значительное влияние на трансформацию подходов к улучшению городской инфраструктуры как в рамках отдельного региона, так и в контексте взаимодействия между регионами внутри страны.

**Цель работы:** провести комплексный анализ городов и определить факторы, способствующие или препятствующие их развитию с учетом критериев устойчивого развития в исторической ретроспективе, выявить проблемы и провести сравнительный анализ с заделом на продолжение исследования – разработку научно-практических рекомендаций для обеспечения устойчивого развития сибирских городов (Омск и Новокузнецк) в перспективе их развития.

**Задачи исследования:**

1. Выявить критерии устойчивого развития территории, изучив интегральную типологию Б.С. Хорева и методику Минстроя по определению индекса качества городской среды.

2. По выбранным методикам и критериям провести комплексный анализ городов – Омска и Новокузнецка – в хронологических границах 1917–2024 гг. и выявить факторы «развития» и факторы «преграды» городов. По проведенному анализу определить следующие задачи на продолжение исследования.

### **Материалы и методы исследования**

Рейтинги городов по качеству жизни в настоящее время формируются на национальном, континентальном и глобальном уровнях, данным анализом занимаются консалтинговые компании, одни из них: Mercer, Arcadis, журнал The Global Liveability Index Economist Intelligence Unit (EIU) и др. [4–6] С недавнего времени оценивать качество городской среды стали и в России, исследования проводит Институт территориального планирования «Урбаника», НИУ ВШЭ [7], но основным отечественным индексом данного типа является Индекс качества городской среды (ИКГС) (данный индекс разработало КБ «Стрелка»), который рассчитывается Минстроем с 2018 г. [2, 8].

Необходимо отметить, что отечественные и зарубежные методики оценки качества жизни в городах основаны на таких критериях, как безопасность, комфорт, экологичность и здоровье, оценка развитости инфраструктуры,

социологическая среда и развитие городского пространства. Данные критерии разрабатывались с учетом урбанизации городских территорий, т. к. она определяет ряд аспектов – развитие экономических, политических и культурных функций городов, а также разделение труда. Вследствие этих процессов формируются новые городские поселения, а также происходит естественный прирост жителей и миграция [9]. На сегодняшний день самыми комфортными городами, согласно сайту Statista [2], в России являются города-миллионники: Москва, Нижний Новгород, Казань, Краснодар и др. Среди крупных городов: Новокузнецк, Барнаул, Томск, Брянск, Белгород и др. [10]. За рубежом, согласно ЕIU [11], в двадцатку лучших вошли 5 городов из Австралии, 3 – из Канады, Японии, Германия и др. Первое место занимает г. Вена.

Для проведения комплексного анализа городов и определения факторов, способствующих или препятствующих их развитию, необходимо понять, на каких аспектах базируется устойчивое развитие населенных пунктов. Согласно исследованиям В.С. Вагина, С.Г. Шеина и К.В. Чубаровой, на устойчивое развитие городов влияют следующие факторы: экологические, экономические, градостроительные и социальные [12]. К данному перечню необходимо добавить еще два критерия: географическое и геополитическое положения и демографию. Устойчивое развитие города требует учета всех этих аспектов и разработки комплексной стратегии, учитывающей специфику конкретного населенного пункта (рис. 1). Изучением методик определения индекса городской среды занимались А.Э. Энгельгард, А.Ю. Липовка, И.Г. Федченко, А.Ю. Шолохов и др.

Проведем анализ градостроительного и экономического развития двух рассматриваемых городов: Омска и Новокузнецка, а также их географического и геополитического положения (рис. 1).



Рис. 1. Схема факторов, влияющих на устойчивое развитие городов (автор А.В. Николаева)

Fig. 1. Flow chart of sustainable urban development (Author A.V. Nikolaeva)

Градостроительное развитие городов базируется на оценке транспортной и инженерной инфраструктуры, экономическое – на росте промышленной деятельности; оценка геополитического положения городов проводится с учетом изменения их статуса. На рис. 2 и 3 приведены хронологические схемы развития городов в исторической ретроспективе с учетом становления и изменения отраслей промышленности в городах, формирования транспортных и инженерных

коммуникаций. На схемах видно, что города многофункциональны, транспортная инфраструктура развивается медленно из-за недостатка материалов и дефицита кадров, инженерная инфраструктура развивается постепенно, так, с учетом темпорального анализа следует отметить ключевые годы: 1940–60-е, 2017–2024 гг. В эти периоды отмечается прокладка инженерных коммуникаций, покрывающих большую потребность населения в них. Климат в городах условно комфортный.

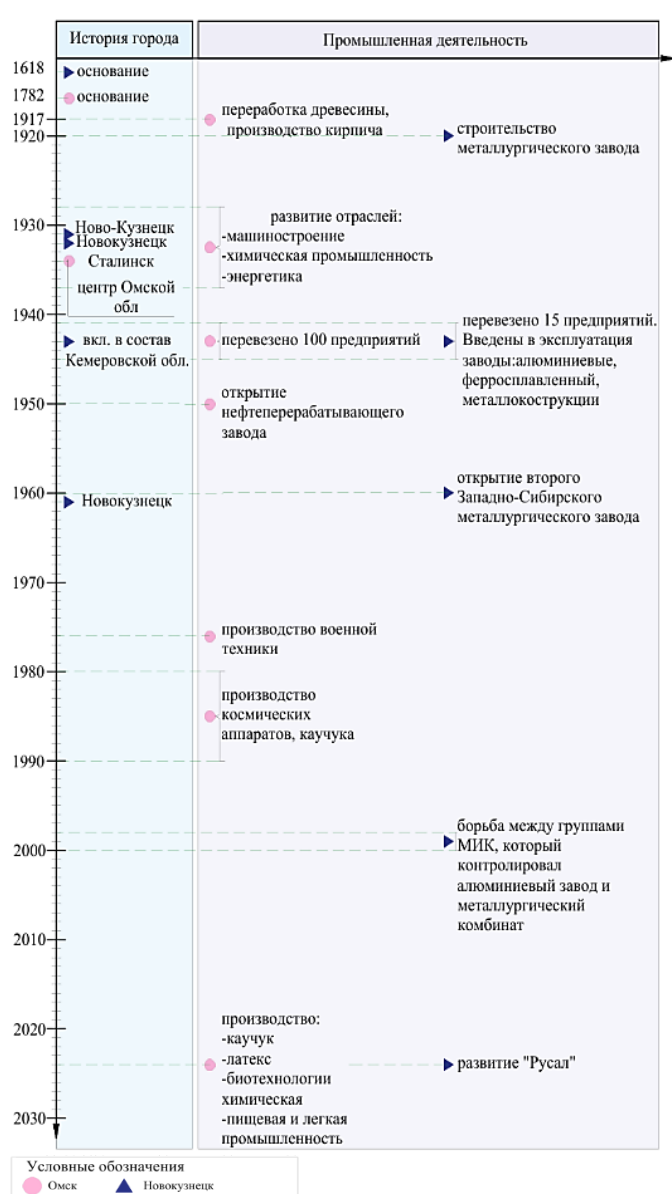


Рис. 2. Схема изменения административного статуса и развития промышленности в городах (автор А.В. Николаева)

Fig. 2. Flow chart of changing the administrative status and industrial development in cities (Author A.V. Nikolaeva)

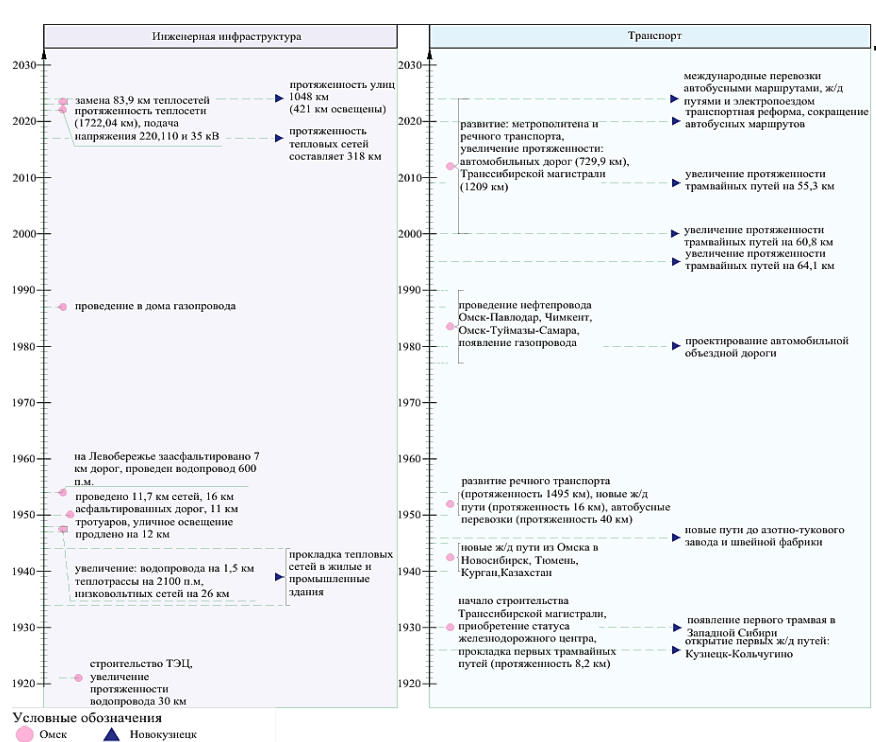


Рис. 3. Схема развития инженерной и транспортной инфраструктуры в городах (автор А.В. Николаева)

Fig. 3. Flow chart of engineering and transport infrastructure development in cities (Author A.V. Nikolaeva)

Рассмотрим экологические и социальные аспекты развития городов (согласно рис. 1). В 1960–1990 гг. **Омск** был «городом-садом», но затем массово вырубали деревья из-за аварийности и отсутствия ухода [13]. В 2006 г. рекреационные зоны были перегружены в 1,6 раза [14]. В 2011 г. Омск лидировал по плохой экологии, но к 2014 г. ситуация улучшилась благодаря модернизации производств [15]. Основные причины плохой экологии: большое количество транспорта, нерациональное использование земли, промышленные предприятия и высокая концентрация фенолов в воде [16, 17]. Воздух загрязнен, но с 2018 г. Омск участвует в проекте «Чистый город» [18].

В **Новокузнецке** также наблюдается плохая экологическая обстановка из-за промышленных предприятий и автомобильного парка [19]. В 2019 г. город присоединился к национальному проекту «Чистый воздух», снизив объемы выбросов на 11,5 % [19]. Экологический каркас формируется на основе природных и антропогенных ландшафтов, с зеленой зоной в 22,5 тыс. га вокруг города (за счет массовых озеленений в 1940–50-е гг.), в 2023 г. было высажено более 70 тыс. деревьев [20, 21].

Согласно методологии Минстроя, проводят оценку рейтинга качества среды с целью выявления положительных и отрицательных факторов, влияющих на развитие рассматриваемых городов. Омск в 2023 г. среди крупнейших

городов был с низким индексом городской среды (оценка проводится по 6 критериям). Индикатор считается положительным, если оценка за направление от 30 баллов. В Омске за 7 лет значительно улучшилась улично-дорожная сеть, качество жилья и социальная инфраструктура, отрицательный фактор – это снижение качества и репрезентативности озелененных пространств. В Новокузнецке показатели выше, по сравнению с Омском, в городе проводится активное озеленение территории, однако отмечается замедленное развитие общественно-деловой инфраструктуры [2] (табл. 1).

Таблица 1

## Сравнительная таблица индексов городской среды

Table 1

## Comparison of urban environment indexes

| Направление                                                   | Омск |      |      |      | Новокузнецк |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|
| Год                                                           | 2018 | 2020 | 2022 | 2024 | 2018        | 2020 | 2022 | 2024 |
| Жилье и прилегающие пространства                              | 19   | 21   | 28   | 36   | 36          | 40   | 41   | 42   |
| Улично-дорожная сеть                                          | 10   | 20   | 27   | 30   | 34          | 29   | 36   | 39   |
| Озеленение пространства                                       | 16   | 18   | 16   | 21   | 21          | 26   | 31   | 40   |
| Общегородское пространство                                    | 20   | 22   | 30   | 29   | 36          | 32   | 34   | 38   |
| Общественно-деловая инфраструктура и прилегающие пространства | 16   | 15   | 25   | 35   | 16          | 17   | 23   | 27   |
| Социально-досуговая инфраструктура и прилегающие пространства | 20   | 17   | 28   | 32   | 26          | 33   | 36   | 42   |

В рассматриваемый временной период генеральный план Омска был изменен трижды, и главной целью было увеличить зеленые зоны в городе, учитывая его неблагоприятную экологическую ситуацию. Освоение левобережья началось лишь с разработки проекта в 1935 г. Проектировщики решили изменить планировку города и заложить в проект промышленные районы на севере и востоке. Но из-за разногласий с администрацией города от идеи внести что-то новое в планировку территории отказались в пользу исторически сложившегося ландшафта (совмещались веерная и линейная типологии планировок). Последний генеральный план был разработан в начале 2000-х гг. Институтом территориального планирования «Град» и утвержден до 2040 г. Во время разработки были учтены все пожелания жителей города, но на карте планируемого размещения объектов не было отмечено появление метрополитена, не указано, как будут осваиваться территории аэропорта. В соответствии со статьей М.Ю. Маковецкого и П.С. Череповецкого [22] отмечается, что присутствует минимальное количество дорог-дублеров, а также не расширяются существующие магистрали, не развивается социальная инфраструктура, ухудшаются социально-экономические условия, есть низкий производственный потенциал.

В послереволюционный период площадь зеленых насаждений составляла 39 га, в 1975 г. открылся парк на 213 га, к 2040 г. предполагается увеличить зеленые пространство до 3500 га.

Генеральный план развития Новокузнецка неоднократно подвергался разработке, при этом учитывались особенности исторического ландшафта и климатические условия (лучевая типология планировок). *Были предложены проекты с расширением магистралей, появлением монументальных архитектурных ансамблей.* Однако лишь немногие из этих проектов были воплощены в жизнь: в основном развивалась центральная часть города, а затем и промышленные территории. Текущий проект, утвержденный до 2044 г., определяет развитие инженерной, транспортной и социальной инфраструктур с учетом прогнозируемого роста населения [23–25].

Необходимо отметить, что в разные периоды не были реализованы многие идеи из-за кризиса в стране, смены власти, дефицита кадров, из-за большего вложения в развитие новых территорий. При всем этом увеличилась нагрузка на общественные пространства, быстро изнашивалась инфраструктура, увеличивалась плотность застройки, а новые планировки не были реализованы из-за предпочтения сохранить естественный ландшафт (рис. 4).

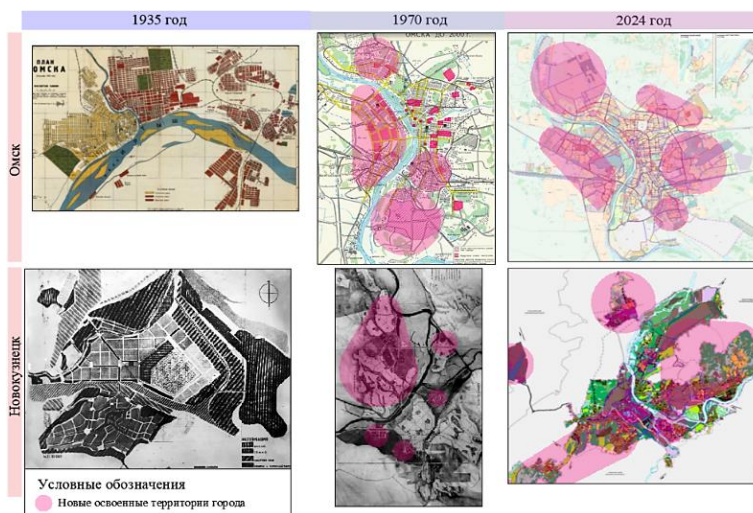


Рис. 4. Схема генеральных планов городов Омска и Новокузнецка (автор А.В. Николаева)  
Fig. 4. Schematic of Omsk and Novokuznetsk master plans (Author A.V. Nikolaeva)

Природный каркас города намного больше, чем в Омске (согласно рис. 4). На протяжении всего времени сохраняется исторически сложившийся ландшафт: в настоящий момент 416 га городских зеленых пространств, 5553 га городских лесов. К 2044 г. городские зеленые пространства могут увеличиться до 1135 га. Архитектурно-градостроительный облик городов однообразен: в эпоху правления И.В. Сталина присутствовал сталинский ампи́р, барокко, после – типовые строения во время правления Н.С. Хрущева. Высотных зданий в городах не наблюдается, т. к. в этом нет никакой необходимости.

В табл. 2 приведен сравнительный анализ городов по ключевым критериям.



Таблица 2  
Сравнительная таблица городов (автор А.В. Николаева)  
Table 2  
Comparison of cities (Author A.V. Nikolaeva)

| Город                                             | Омск                                                                                                                                                      | Новокузнецк                                                                                                                                                      |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------|--------------------|-----------|---------------|
| Географическое и геополитическое положение        |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Связь с регионами (транспортные коммуникации)     | Наземные, водные, воздушные                                                                                                                               |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Плотность и состав населения                      | 1 818 096 тыс. чел., наиболее многочисленная национальность – русские                                                                                     | 531 186 тыс. чел., наиболее многочисленная национальность – русские                                                                                              |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Природно-климатические условия                    | Континентальный умеренный                                                                                                                                 | Резко континентальный                                                                                                                                            |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Статус и параметры города, удаленность от столицы | Расположен в СФО. Город областного назначения, важный транспортный узел, центр агломерации; $S_{\text{гор}} = 577,9 \text{ км}^2$                         | Расположен в СФО. Город областного подчинения, ж/д узел Кузбасского отделения Западно-Сибирской дороги, центр агломерации; $S_{\text{гор}} = 384,7 \text{ км}^2$ |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Экономическое развитие                            |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Развитие промышленной деятельности                | Развита пищевая и химическая промышленность                                                                                                               | Развитие металлургической отрасли и добыча угля                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Развитие местного бизнеса                         | Инвестиции в промышленную деятельность и развитие малого и среднего предпринимательства                                                                   |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Трудоустройство                                   | Наблюдается дефицит кадров за пределами промышленного сектора                                                                                             |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Экологическое развитие                            |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Экологическое восстановление                      | В городах разрабатываются генеральные планы с упором на восстановление экологии и появление новых общественных «зеленых» пространств                      |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Площадь зеленых насаждений на 1 человека          | 1917<br>0,1                                                                                                                                               | 1945–1947<br>0,05                                                                                                                                                | 1980<br>0,013                                                                                           | 2024<br>0,014 | 1917<br>– | 1945–1947<br>0,018 | 1980<br>– | 2024<br>0,009 |
| Социологическое развитие (см. табл. 1)            |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Индекс качества жизни                             | Индекс – 183 балла (2024 г.)<br>Отрицательные показатели: общегородские пространства – 29 баллов, озеленение территории – 21 балл                         |                                                                                                                                                                  | Индекс – 228 баллов (2024 г.)<br>Отрицательные показатели: общественно-деловое пространство – 27 баллов |               |           |                    |           |               |
| Социальная инфраструктура                         | Наблюдаются проблемы в данной сфере в некоторых районах города                                                                                            |                                                                                                                                                                  | Ускоренный темп развития данной сферы, высокие показатели                                               |               |           |                    |           |               |
| Градостроительное развитие                        |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |
| Архитектурно-градостроительный облик (АГО)        | Типовая застройка зданий, преобладает сталинский ампи́р и застройка времен правления Н.С. Хрущева. Высотное строительство неперспективно, не имеет спроса |                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |               |           |                    |           |               |

Окончание табл. 2  
End of table 2

| Город                                                                | Омск                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |        |        | Новокузнецк                                                                       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Градостроительное развитие                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |        |        |                                                                                   |       |       |       |
| Транспортная инфраструктура                                          | Появление Транссибирской магистрали, развитие речного транспорта, развитие ж/д пути, плохо развита дорожная коммуникация между берегами                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |       |        |        | Развитые ж/д пути внутри города, хорошая транспортная коммуникация между городами |       |       |       |
| Природный каркас                                                     | Малые площади озелененных пространств, аварийное состояние зеленых насаждений, высокая концентрация фенолов в воде. Участие в проекте «Чистый город»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |        |        | Большие площади зеленых пространств. Участие в проекте «Чистый воздух»            |       |       |       |
| Территориальное планирование                                         | В Омске в 1917–1990 гг. территория развивалась за счет строительства новых предприятий, создания санитарно-защитных зон и рационального размещения застройки. До 2040 г. утвержден генплан, предусматривающий увеличение зеленых территорий, развитие транспортной сети: трамвайные линии, велодорожки. В Новокузнецке в 1936–1990 гг. наблюдалась тенденция расширения территории с учетом экономических и природных условий. В новом генеральном плане предполагается расширение зеленых зон, строительство новых микрорайонов, модернизация транспортной инфраструктуры |       |        |        |                                                                                   |       |       |       |
| Демография                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |        |        |                                                                                   |       |       |       |
| Численность населения (тыс. чел.)<br>[26, с. 59; 27, с. 490–491; 28] | 1917                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 1941  | 1989   | 2024   | 1917                                                                              | 1940  | 1989  | 2024  |
|                                                                      | 113,6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 141,8 | 1148,5 | 1140,5 | 3,154                                                                             | 179,1 | 599,9 | 531,2 |
| Коэффициент смертности                                               | 0,081                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | –     | 0,009  | 0,008  | –                                                                                 | –     | 0,012 | 0,05  |
| Коэффициент рождаемости                                              | 0,032                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | –     | 0,015  | 0,005  | –                                                                                 | –     | 0,010 | 0,02  |
| Уровень урбанизации, % [29, 30]                                      | 1945                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 1991  | 2018   | 2024   | 1917–1945                                                                         | 1990  | 2018  | 2023  |
|                                                                      | 58,8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 67,6  | 72,7   | 73,6   | –                                                                                 | 87,1  | 86,0  | 90,0  |

Согласно показателям демографии, в рассматриваемых городах отмечается депопуляция, в свою очередь, показатели урбанизации в Омске стремительно растут до уровня 1989 г., а в Новокузнецке на сегодняшний день наблюдаются высокие показатели. Следует учитывать, что урбанизация влечет за собой ряд негативных последствий, включая перегруженность транспортных потоков, ухудшение экологической ситуации, деградацию зеленых зон, низкое качество инфраструктуры и высокие тарифы на услуги, устойчивость к климатическим условиям, а также повышенный уровень криминогенной активности.

В ходе исследования были выявлены факторы развития и сдерживающие факторы двух городов (табл. 3). Перечисленные аспекты влияют на устойчивое развитие территории, являются ключевыми при оценке качества городской среды – все это приводит к оттоку населения и к первым шагам «вымирания» города.

Таблица 3

**Факторы развития и сдерживающие факторы городов**  
(автор А.В. Николаева)

Table 3

**Factors of urban development and barriers (Author A.V. Nikolaeva)**

| Город                | Омск                                                                                                                                                                                 | Новокузнецк                                                                                             |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Факторы развития     | Развитие пищевой и химической промышленности                                                                                                                                         | Развитие металлургической отрасли и добыча угля                                                         |
|                      | Развитая социальная инфраструктура, предполагается дальнейшее развитие                                                                                                               | Быстрое развитие транспортной инфраструктуры в черте города и за пределами, а также зеленых пространств |
|                      | Реновация промышленных предприятий с целью улучшения экологии города                                                                                                                 |                                                                                                         |
|                      | Выгодное географическое положение                                                                                                                                                    |                                                                                                         |
|                      | Разработка генеральных планов с учетом транспортных и экологических проблем: строительство новых дорог (дорог-дублеров), прокладка рельсов, проектирование новых зеленых пространств |                                                                                                         |
| Сдерживающие факторы | Плохое обслуживание дорог, отсутствие метрополитена                                                                                                                                  | Плохая экологическая обстановка из-за промышленных предприятий и автомобильного парка                   |
|                      | Плохое состояние водных ресурсов, аварийное состояние зеленых насаждений, перегруженность экологической емкости парков                                                               |                                                                                                         |
|                      | Медленное развитие озелененных и общегородских пространств                                                                                                                           | Медленное развитие общественно-деловой инфраструктуры                                                   |
|                      | Снижение уровня потребления на внутреннем рынке, дефицит кадров                                                                                                                      |                                                                                                         |
|                      | Износ инженерной инфраструктуры                                                                                                                                                      |                                                                                                         |

Исследование выявило серьезные проблемы городов: транспортная усталость, экологические и экономические проблемы, слаборазвитая социальная инфраструктура, которые встречаются в любом населенном пункте с низким уровнем качества городской среды. Для формирования устойчивого развития города необходимо применять комплексный подход, включающий планирование городской инфраструктуры с учетом потребностей жителей, разработку новых концепций, применение опыта успешных городов.

**Заключение**

Таким образом, были выявлены факторы развития и сдерживающие факторы двух городов. Для улучшения качества городской среды и привлечения

населения в города необходимо тщательно планировать развитие городской инфраструктуры. При этом следует учитывать потребности жителей и опыт городов с высоким качеством среды, таких как Москва, Санкт-Петербург, Сингапур, Берлин и др. Также требуется более детально изучить проекты территориального планирования в ретроспективе для лучшего понимания факторов, сдерживающих и стимулирующих развитие. Эти аспекты будут рассмотрены в следующих исследованиях.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хорев Б.С. Проблемы городов. Москва : Мысль, 1975. 428 с.
2. *Исследовательский отдел Statista*: уровень урбанизации в России по состоянию на 1 января 2024 года по федеральным округам // Statista : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3LcWVT> (дата обращения: 19.01.2025).
3. *Индекс качества городской среды* – инструмент для оценки качества материальной городской среды и условий ее формирования // Индекс качества городской среды : [сайт]. URL: <https://индекс-городов.рф/#/> (дата обращения: 19.01.2025).
4. Энгельгардт А.Э., Липовка А.Ю., Федченко И.Г. Международный опыт индексирования качества городской среды // Урбанистика. 2018. № 4. С. 77–87. DOI: 10.7256/2310-8673.2018.4.27886. EDN: YUHOAX
5. Шолохов А.Ю. Рейтинг комфортности городов мира и актуальные урбанистические тенденции 21 века // Научный журнал. 2021. № 1 (56). С. 39–45. EDN: FPHANW
6. Богачев С.В., Пинская М.Р. Самостоятельность местного самоуправления в комфортных городах мира // Управленческие науки. 2019. № 1. URL: <https://clck.ru/3LcVWX> (дата обращения: 22.04.2025).
7. Нотман О.В. Индексный метод оценки качества городской среды: международный и российский опыт // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 1: Регионоведение: философия, история, социология, юриспруденция, политология, культурология. 2021. № 2 (279). С. 89–99. DOI: 10.53598/2410-3691-2021-2-279-89-99. EDN: WQFFGI
8. *Индексы городов* как инструменты оценки городского развития. Аналитический отчет. Москва, 2024. 83 с.
9. Руднева Е. Урбанизация // банки.ру : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3MND5Z> (дата обращения: 19.01.2025).
10. Бурмистрова Д. Наконец-то столица мира. Власти России назвали Нижний одним из самых комфортных городов страны // NN.RU : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3MNSYb> (дата обращения: 19.01.2025).
11. Топ-20 лучших в мире городов для жизни // БКС ЭКСПРЕСС. 30 лет побед : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3LcVed> (дата обращения: 22.04.2025).
12. Вагин В.С., Шеина С.Г., Чубарова К.В. Принципы и факторы устойчивого развития городских территорий // Науковедение : интернет-журнал. 2015. Т. 7. № 3 (28). С. 9. DOI: 10.15862/91EVN315. EDN: UMFVUL
13. *Экология Омска* // РУВИКИ : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3MNDZD> (дата обращения: 22.04.2025).
14. Алексеенко Е.В. Экологическая устойчивость культурных ландшафтов промышленного города (на примере парков г. Омска) : специальность 03.00.16 «Экология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Алексеенко Елена Вячеславовна ; Омский государственный педагогический университет. Омск, 2006. 18 с.
15. Вегнер В.Ю. Экологическое состояние территории города Омска и Омской области за последнее десятилетие // Мировая наука. 2018. № 5 (14). С. 189–191. EDN: RUZJJJ
16. Кубрина Л.В. Экологическая оценка состояния почв техногенных территорий на примере г. Омска // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 12 (126). URL: <https://clck.ru/3M8EFY> (дата обращения: 24.04.2025). DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.65
17. Гоголева Н.А., Белькова С.В. Мониторинг загрязненности водных объектов Омской области // Экологические проблемы региона и пути их разрешения : материалы XIII Между-

- народной научно-практической конференции, 15–16 мая 2019 г. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 4–8.
18. Батищева А.С., Стрекалова С.А. Социально-экологические проблемы города Новокузнецка. Пути их решения // Экономика и социум. 2015. № 5 (18). С. 146–152. EDN: VJWPVV
  19. «Чистый воздух» в Новокузнецке. Как в крупнейшем промышленном центре Кузбасса решают проблемы выбросов // mpr.gov : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3M8Fhf> (дата обращения: 24.04.2025).
  20. Таргаева Е.Е., Андреева О.С. Изучение особенностей формирования экологического каркаса индустриального города (на примере г. Новокузнецка) // Географический вестник. 2018. № 3 (46). URL: <https://clck.ru/3M8GB2> (дата обращения: 24.04.2025).
  21. Более 70 тысяч деревьев высадили в Новокузнецком округе в 2023 году // Муниципальное образование «Новокузнецкий муниципальный округ» : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3M8GTG> (дата обращения: 24.04.2025).
  22. Маковецкий М.Ю., Череповецкий П.С. 300 лет Омску: великое прошлое, нереализованный потенциал настоящего и возможные траектории будущего развития // ОНВ. ОИС. 2016. № 2. С. 105–109. EDN: XXIEAB
  23. Овсянникова А.Л., Андреева О.С., Егорова Н.Т., Черных Д.В. Периодизация формирования города Новокузнецка на основе ландшафтного подхода // Вестник Карагандинского университета. Серия: Биология. Медицина. География. 2024. Т. 113. № 1. С. 171–178. DOI: 10.31489/2024BMG1/171-178. EDN: AIXRRW
  24. Отурин П.И. Планировка и застройка городов Южного Кузбасса : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Отурин Павел Иванович. Новосибирск, 1964. 20 с.
  25. Магель В.И. История создания генерального плана города. Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2017. 386 с. ISBN: 978-5-7806-0598-0.
  26. Кочедамов В.И. Омск. Как рос и строился город. Омск : Омское книжное изд-во, 1960. 113 с.
  27. Численность населения Новокузнецка // МБУ «МИБС» г. Новокузнецка : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3LcWKG> (дата обращения: 19.01.2025).
  28. Шорина Е.В. Экономика Омской области накануне, во время и после Великой Отечественной войны 1941–1945 годов : информационно-статистический сборник. Омск, 2018. 164 с.
  29. Омская область // Статистика по России : [сайт]. URL: <https://russia.duck.consulting/regions/55> (дата обращения: 19.01.2025).
  30. Кемеровская область // Статистика по России : [сайт]. URL: <https://russia.duck.consulting/regions/42#collapse791732> (дата обращения: 19.01.2025).

## REFERENCES

1. Horev B.S. Problems of Cities. Moscow: Mysl, 1975, 428 p. (In Russian)
2. Statista research department: Level of urbanisation in Russia as of 1 January 2024 by federal districts. Available: <https://clck.ru/3LcWVT> (accessed January 19, 2025). (In Russian)
3. Urban environment quality index as a tool for assessing the quality of the material urban environment and the conditions for its formation. Available: <https://индекс-городов.рф/#/> (accessed January 19, 2025). (In Russian)
4. Engelhardt A.E., Lipovka A. Y., Fedchenko I.G. International Experience of Indexing Urban Environment Quality. *Urbanistika*. 2018; (4). Available: <https://clck.ru/3LcVHc> (In Russian)
5. Sholokhov A.Y. Comfort Rating in Cities in the World and Current Urban Trends of the 21st Century. *Nauchny zhurnal*. 2021; (1) (56): 39–45. EDN: FPHANW (In Russian)
6. Bogachev S.V., Pinskaya M.R. Independence of Local Self-Government in Comfortable Cities of the World. *Upravlencheskie nauki*. 2019; (1). Available: <https://clck.ru/3LcVWX> (accessed April 22, 2025). (In Russian)
7. Notman O.V. Index Method for Assessing the Quality of the Urban Environment: International and Russian Experience. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Regionovedenie: filosofiya, istoriya, sotsiologiya, yurisprudentsiya, politologiya, kul'turologiya*. 2021; 2 (279): 89–99. DOI: 10.53598/2410-3691-2021-2-279-89-99. EDN: WQFFGI (In Russian)

8. City indexes as tools for assessing urban development. Analytical report. Moscow, 2024. 83 p. (In Russian)
9. Rudneva E. Urbanisation. Available: <https://clck.ru/3MND5Z> (accessed January 19, 2025). (In Russian)
10. Burmistrova D. Finally the capital of the world. The Russian authorities called Nizhny Novgorod one of the most comfortable cities in the country. Available: <https://clck.ru/3MNSYb> (accessed January 19, 2025). (In Russian)
11. Top-20 best cities in the world to live. Available: <https://clck.ru/3LcVed> (accessed April 22, 2025). (In Russian)
12. Vagin V.S., Sheina S.G., Chubarova K.V. Principles and Factors of Sustainable Urban Development. *Naukovedenie*. 2015; 7 (3): 9. DOI: 10.15862/91EVN315 (In Russian)
13. Ecology of Omsk. Available: <https://clck.ru/3MNDZD> (accessed April 22, 2025). (In Russian)
14. Alekseenko E.V. "Ecological sustainability of cultural landscapes of an industrial city (on the example of parks in Omsk)". PhD Abstract, Omsk State Pedagogical University. Omsk, 2006. 18 p. (In Russian)
15. Wagner V.Y. Ecological State of the Territory of the City of Omsk and the Omsk Region Over the Last Decade. *Mirovaya nauka*. 2018; 5 (14): 189–19. EDN: RUZJJJ (In Russian)
16. Kubrina L.V. Ecological Assessment of Soil Condition of Man-Made Territories in Omsk. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2022; 12 (126). DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.65 (In Russian)
17. Gogleva N.A., Belkova S.V. Monitoring of Water Pollution in the Omsk Region. In: *Proc. 13th Int. Sci. Conf. 'Environmental Problems in the Region and Ways to Solve Them'*. May 15–16, Omsk, 2019. Pp. 4–8. (In Russian)
18. Batishcheva A.S., Strekalova S.A. Socio-ecological problems of the city of Novokuznetsk. Ways to solve them. *Ehkonomika i sotsium*. 2015; 5-1 (18): 146–152. EDN: VJWPVV (In Russian)
19. "Clean air" in Novokuznetsk. How emissions problems are solved in the largest industrial center of Kuzbass. Available: <https://clck.ru/3M8Fhf> (accessed April 24, 2025). (In Russian)
20. Targaeva E.E., Andreeva O.S. Ecological Framework Formation of Industrial City (the Novokuznetsk case study). *Geograficheskii vestnik*. 2018; 3 (46). Available: <https://clck.ru/3M8GB2> (accessed April 24, 2025). (In Russian)
21. More than 70 thousand trees were planted in Novokuznetsk district in 2023. Available: <https://clck.ru/3M8GTG> (accessed April 24, 2025). (In Russian)
22. Makovetsky M.Y., Cherepovetsky P.S. Omsk's Tercentenary: The Great Past, Unrealized Potential of Present and Possible Trajectories of Future Development. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Obshchestvo. Istoriya. Sovremennost'*. 2016; (2): 105–109. EDN: XXIEAB (In Russian)
23. Ovsyannikova A.L., Andreeva O.S., Egorova N.T., Chernykh D.V. Periodisation of Novokuznetsk Formation based on Landscape Approach. *Biologiya. Meditsina. Geografiya*. 2024; 29, 113 (1): 171–178. DOI: 10.31489/2024BMG1/171-178. EDN: AIXRRW (In Russian)
24. Oturin P.I. "Planning and construction of southern Kuzbas". PhD Abstract. Novosibirsk, 1964. 20 p. (In Russian)
25. Magel V.I. The history of General Plan of the City. Novokuznetsk, 2017. 386 p. (In Russian)
26. Kochedamov V.I. Omsk. How the City Grew and was Built. Omsk, 1960. 113 p. ISBN 978-5-7806-0598-0. (In Russian)
27. The population of Novokuznetsk. Available: <https://clck.ru/3LcWKG> (accessed January 19, 2025). (In Russian)
28. Shorina E.V. Omsk Region Economy on the Eve, during and after the Great Patriotic War of 1941–1945. *Informatsionno-statisticheskii sbornik*. Omsk, 2018. 164 p. (In Russian)
29. The Omsk region. Available: <https://russia.duck.consulting/regions/55> (accessed January 19, 2025). (In Russian)
30. The Kemerovo region. Available: <https://russia.duck.consulting/regions/42#collapse791732> (accessed January 19, 2025). (In Russian)

#### Сведения об авторах

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



*Николаева Анна Владимировна*, магистрант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, a.nikolayeva@sibstrin.ru

**Authors Details**

*Olesya O. Smolina*, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, o.smolina@sibstrin.ru

*Anna V. Nikolaeva*, Graduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, a.nikolayeva@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 15.02.2025  
Одобрена после рецензирования 21.04.2025  
Принята к публикации 17.06.2025

Submitted for publication 15.02.2025  
Approved after review 21.04.2025  
Accepted for publication 17.06.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 116–127.

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 (5): 116–127.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

#### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 692.6(470)<sup>4</sup>18/19<sup>4</sup>

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-116-127

EDN: MULPNY

### КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВЯННЫХ ЛЕСТНИЦ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ ТОМСКА КОНЦА XIX – НАЧАЛА XX ВЕКА

**Александр Кутуков, Лариса Степановна Романова,  
Евгения Николаевна Колокольцева**

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

**Аннотация.** В статье приведены сведения об устройстве деревянных лестниц в исторической застройке городов Российской империи, и в частности г. Томска, конца XIX – начала XX в., согласно принципам и рекомендациям соответствующего временного периода. Анализ проведен на основе книг и альбомов чертежей гражданских инженеров и архитекторов, публиковавшихся в конце XIX – начале XX в., а также примеров реальных зданий г. Томска того же периода постройки.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью применения аутентичных строительных методик при реставрации архитектуры, что невозможно без знания строительных принципов и конструкций, соответствующих времени постройки.

**Цель работы** – изучение конструктивных решений деревянных лестниц.

**Новизна** исследования состоит в выявлении и обобщении материала по строительству деревянных лестниц в указанный временной период, а также в проведении сравнительного анализа типовых решений, применявшихся в Российской империи, с конструктивными решениями лестниц застройки Томска того же периода.

**Теоретическая значимость** заключается в выявлении конструктивных особенностей деревянных лестниц в зданиях и сооружениях Томска конца XIX – начала XX в. и во введении в научный оборот ранее не опубликованных материалов.

**Практическая значимость** заключается в возможности использования материалов статьи в процессе обучения архитекторов и инженеров-реставраторов, а также при выполнении научно-проектной документации по реставрации исторических зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** изучение исторических источников, памятник архитектуры, историческое здание, внутренние и наружные лестницы, конструктивные особенности, сохранение, реставрация

**Для цитирования:** Кутуков А., Романова Л.С., Колокольцева Е.Н. Конструкции деревянных лестниц в исторической застройке Томска конца XIX – начала XX века // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 116–127. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-116-127. EDN: MULPNY

## ORIGINAL ARTICLE

## DESIGN OF WOODEN STAIRCASES IN HISTORICAL HOUSES OF TOMSK IN THE 19–20th CENTURIES

Aleksandr Kutukov, Larisa S. Romanova, Evgeniya N. Kolokol'tseva

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

**Abstract.** The article deals with the arrangement of wooden stairs in historical buildings of the Russian Empire and Tomsk late in the 19th and early 20th centuries. The analysis is based on books and albums with drawings of civil engineers and architects, published late in the 19th and early 20th centuries, as well as on examples of real buildings of the City of Tomsk.

**Purpose:** The aim of the article is to study design solutions of wooden staircases.

**Theoretical significance:** Identification of design of wooden staircases in Tomsk houses in the 19–20th centuries and introduction of previously unpublished data in the scientific turnover.

**Practical implications:** The obtained results can be used in training architects and restoration engineers.

**Value:** Identification and generalization of documents on construction of wooden staircases in the indicated time period, a comparative analysis of typical solutions used in the Russian empire for staircases in Tomsk houses of the same period of construction.

**Keywords:** historical documents, architectural monument, historical building, internal and external staircases, conservation, restoration

**For citation:** Kutukov A., Romanova L.S., Kolokol'tseva E.N. Design of Wooden Staircases in Historical Houses of Tomsk in the 19–20th Centuries. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 116–127. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-116-127. EDN: MULPNY

## Введение

В статье представлена информация об устройстве деревянных лестниц в исторической застройке городов Российской империи, и в частности г. Томска, согласно принципам и рекомендациям соответствующего периода. На основе книг и альбомов чертежей гражданских инженеров и архитекторов, публиковавшихся в конце XIX – начале XX в., и примеров реальных зданий г. Томска того же периода постройки проведен сравнительный анализ.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью применения аутентичных строительных методик при реставрации исторической застройки, что невозможно без знания строительных конструктивных решений, соответствующих времени постройки.

Цель работы заключается в изучении конструктивных решений деревянных лестниц конца XIX – начала XX в.

В исследовании использован комплексный метод: изучение и систематизация научных и библиографических источников, материалов натурных исследований.

Новизна состоит в выявлении и обобщении материалов по строительству деревянных лестниц в указанный период, а также в проведении сравнительного анализа типовых решений, применявшихся в Российской империи, с конструктивными решениями лестниц застройки Томска того же периода.

Теоретическая значимость – выявление конструктивных особенностей деревянных лестниц зданиях и сооружениях Томска конца XIX – начала XX в., и во введении в научный оборот ранее не опубликованных материалов.

Практическая значимость заключается в возможности использования материалов статьи в процессе обучения архитекторов и инженеров-реставраторов. Статья продолжает тему изучения авторами конструктивных решений лестниц в исторической застройке Томска [1].

### Деревянные лестницы

Деревянные лестницы использовали как снаружи, так и внутри помещений. Снаружи их применяли в основном только в жилой деревянной застройке, внутри – повсеместно. Для защиты *наружных* лестниц от атмосферных воздействий устраивали навесы, выполняли ступени с уклоном вдоль марша и постоянно очищали их от снега, опавшей листвы и прочего мусора, способного удерживать в себе влагу. *Внутренние* деревянные лестницы располагали обычно в неотапливаемых помещениях, часто стоявших на отдельных фундаментах, называемых *прирубам*. Это было связано с тем, что теплые помещения в целом подвержены повышенной влажности, а входные группы, в которых остается вся грязь и снег с улицы, тем более. Также лестничные клетки занимают достаточно большой объем, отопление которого было бы нецелесообразным. Древесину для лестниц применяли сухую и без сучков, чтобы максимально нивелировать коробление, которое, как и любые деформации, сильно влияет на правильность работы узловых соединений и, соответственно, прочность конструкции.

Деревянные лестницы собирали из брусьев или досок. Лестницы из профильных брусьев конструктивно напоминали висячие каменные с дополнительными металлическими связями в виде железной полосы под свободными концами ступеней или двух рядов железных болтов там же, соединяющих ступени попарно. Также их выполняли и по тетивам или косоурам из толстых досок или брусьев. В целом данное конструктивное решение считалось редким. Лестницы из досок выполняли *с накладными и со вставными ступенями*. Снаружи или в качестве черновых применяли лестницы *плотницкой сборки*, которые выполнялись на месте плотниками и имели более простые соединения (рис. 1); *столярная сборка* подразумевала подготовку всех деталей в мастерской (рис. 2). Ступени состоят из отдельных проступей и подступенков, крепящихся с помощью тетивы (иначе называемой щекой) или косоура. В среднем размеры проступей варьировались от 25 до 35 см; подступенка – 9–18 см. В тетиву элементы ступеней врезали примерно на дюйм с помощью специальных пазов, получая вставные ступени и так называемую «жесткую или скользящую заделку» – примерно в два раза более прочное и надежное узловое соединение, способное выдерживать частые динамические нагрузки от людей, обычно свойственные лестницам в помещениях. На косоур ступени монтируются сверху, образуя накладные ступени и «балку на двух опорах», что является менее жестким узловым соединением, но обеспечивает защиту от осадков сверху, благодаря чему именно такую конструкцию предпочитали для внешних лестниц. Проступи и подступенки обычно отличались толщиной примерно 4–6 и 2–3 см соответственно. На передних гранях проступи имели скругленный

«каблучок» или «валик», увеличивавшие ширину ступени на 1–1½ дюйма (2,5–3,8 см) [2, 3, 4].

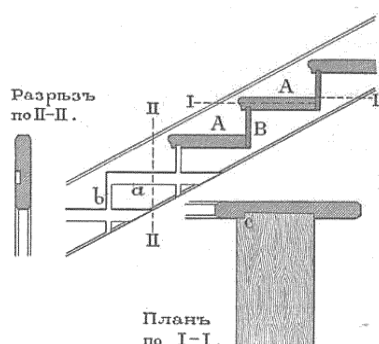


Рис. 1. Деревянная плотницкая лестница на тетиве. В.Р. Бернгард, 1903 г. [3]

*Fig. 1. Wooden carpenter-assembled stairs on a string. V.R. Bergard, 1903 [3]*

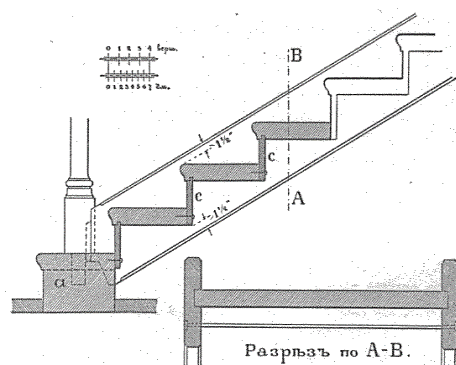


Рис. 2. Деревянная столярная лестница на тетиве.  
В.Р. Бернгард, 1903 г. [3]

*Fig. 2. Wooden joiner-assembled stairs on a string.*  
V.R. Bergard 1903 [3]

*Лестницы на косоурах* отличались в первую очередь способом крепления проступей, а также иногда зубчатой формой направляющей – косоура. Крепление накладных ступеней выполняли с помощью нагелей, гвоздей или винтов, а также врезая *часть проступи* в паз косоура (рис. 3). В среднем на производство косоура всегда требовалось больше материала из-за сравнительно небольшой рабочей зоны, высоту которой делали не менее 6 дюймов (15,3 см). Если длины тетивы или косоура не хватало, то их выполняли составными. Для этого части тетивы соединяли нагелями и стягивали продольно закладными болтами или соединяли металлическими накладками, стягивая болтами поперек или с вырезанным упором [2, 3].

Деревянные внутренние лестницы чаще выполняли методом *столярной сборки на тетивах*. Их отличали более сложные конструктивные решения, качественные материалы и покрытия; размеры конструктивных элементов изменялись только с увеличением пропускной потребности лестницы или различными декоративными элементами. Тетиву выполняли толщиной около 6 см для пристенной и 6–8 см для внутренней или свободной, вырезая в них горизонтальные и вертикальные пазы глубиной до 1 дюйма (2,5 см) по данным В.Р. Бернгарда, и до 3 см по данным Г. Иссея. В эти пазы

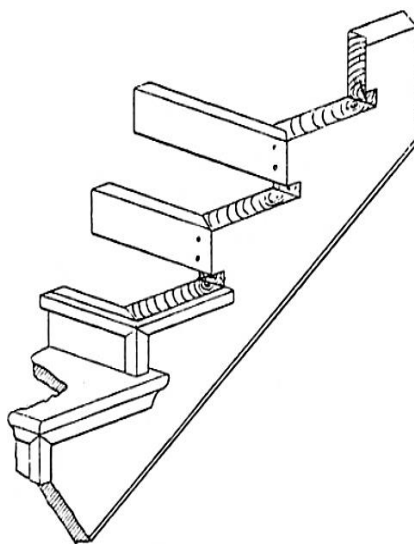


Рис. 3. Косоур деревянной лестницы с пазами под проступи. Г.В. Кирштейн, 1899 г. [2]

*Fig. 3. Ridge of wooden stairs with grooves for treads. G.V. Kirshtein, 1899 [2]*

затдвигали элементы ступеней. Чтобы проступи не вышли из тетивы, последние стягивали друг с другом железными связями (рис. 4). В.Р. Бернгард в 1903 г. утверждал, что проступи фиксировали в пазах без прикручивания или прибивания их к тетивам. Однако Г.В. Кирштейн в 1899 г. привел пример крепления проступей в тетивах с одновременной затяжкой их короткими болтами через закладные или обычные гайки сквозь монтажные отверстия в ступенях (рис. 5), а Г. Иссель в 1917 г. писал, что проступи вклеивали или прибивали гвоздями. Подступенки, помимо пазо-гребневого соединения, прибивали или прикручивали к проступям. При устройстве подступенков на внутренних лестницах было важно обеспечить не только наименьший прогиб ступеней, но и не допустить возникновения щелей или скрипа. Для этого в паз укладывали полосу толстого сукна. Нижнюю поверхность марша обшивали чистовой доской или оштукатуривали по дранке и войлоку. Последний способ, кроме эстетической функции, увеличивал огнестойкость лестницы. Более дешевые и простые лестницы выполняли также открытыми, без подступенков и подшивки. Однако отсутствие подступенка увеличивало прогиб проступи, поэтому подобное решение было характерно только для лестниц с малой пропускной потребностью [2, 3, 4].

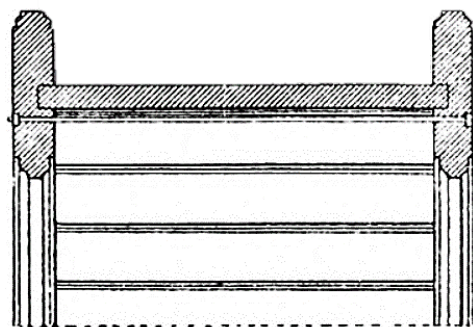


Рис. 4. Железные связи между тетивами деревянной лестницы. Г.В. Кирштейн, 1899 г. [2]

Fig. 4. Iron links between bowstrings of wooden stairs. G.V. Kirshtein, 1899 [2]

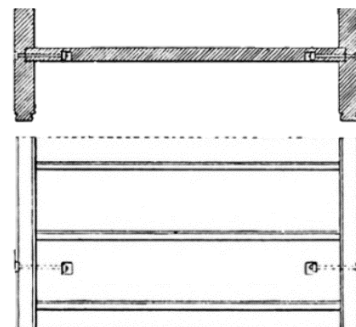


Рис. 5. Железные болты, скрепляющие тетивы и ступени. Г.В. Кирштейн, 1899 г. [2]

Fig. 5. Iron bolts holding together bowstrings and steps. G.V. Kirshtein, 1899 [2]

Размеры *лестничных площадок* регулировались теми же правилами, что и у каменных лестниц: ширина площадки равна ширине лестницы. Количество площадок зависело от высоты подъема и длины лестницы. В среднем примерно через каждые 15 ступеней выполняли промежуточные или разворотные площадки. Эти значения были получены эмпирически и обусловлены средней высотой подъема человека по лестнице без необходимости в отдыхе. Опора тетивы и косоура выполнялась на балки лестничной площадки или специальные ригели. Г. Иссель в 1917 г. писал, что в среднем хватало бруса 20×22 см. Иногда для опоры устанавливали доску как проставку (рис. 8). Также между этой балкой и тетивой могли зажимать балясину перил (рис. 9). Снизу опору выполняли на специальную ступень из цельного бруса (рис. 6) или в балку перекрытия (рис. 7). Врезание тетивы в ступень позволяло раньше и без остатка оборвать



тетиву у первой ступени, что было особенно важно для невысокой тетивы, а также смонтировать нижний столбик поручней. Косоуры монтировали в балку перекрытия или ригель между ними. Крепление тетивы или косоура к стене лестничной клетки выполняли притягиванием болтами или скобой [2, 3, 5].

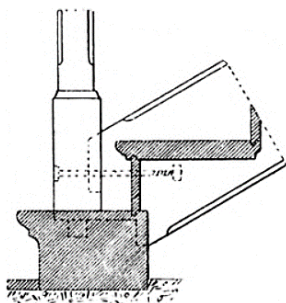


Рис. 6. Опора тетивы деревянной лестницы на ступень из цельного бруса. Г.В. Кирштейн, 1899 г. [2]

Fig. 6. Support of the wooden stair tread on the solid timber stair tread. G.V. Kirshtein, 1899 [2]

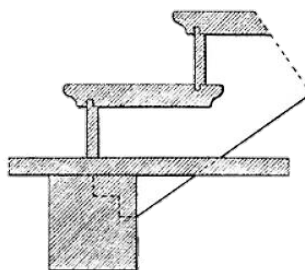


Рис. 7. Опора тетивы деревянной лестницы на специальную балку перекрытия. Г.В. Кирштейн, 1899 г. [2]

Fig. 7. Support of the wooden stair tread on a special floor beam. G.V. Kirshtein, 1899 [2]

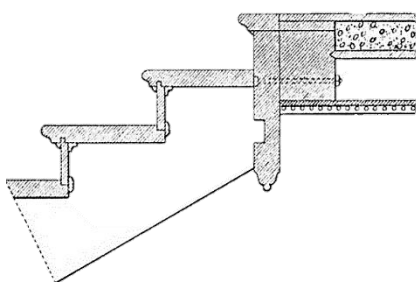


Рис. 8. Опора верхнего конца тетивы деревянной лестницы на проставку из доски. Г.В. Кирштейн, 1899 г. [2]

Fig. 8. Upper end support for wooden staircase bowstring on a board spacer. G.V. Kirshtein, 1899 [2]

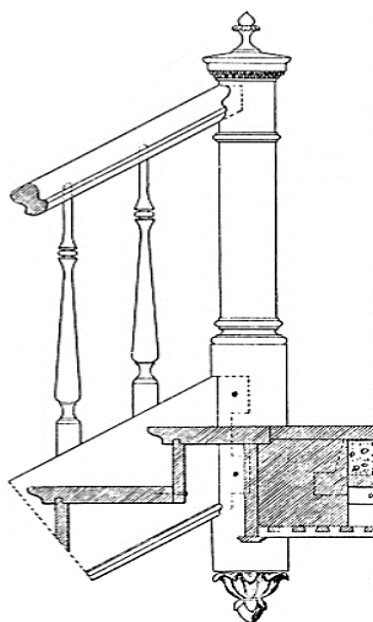


Рис. 9. Деревянный столбик под монтаж перил, зажатый между тетивой и лестничной площадкой. Г.В. Кирштейн, 1899 г. [2]

Fig. 9. A wooden post for mounting the handrail, sandwiched between bowstring and stair landing. G.V. Kirshtein, 1899 [2]

Винтовые лестницы являлись редкими, поскольку они были крайне неудобными в использовании, однако они занимали немного места. Их дополни-

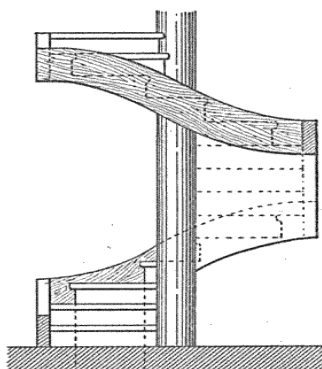


Рис. 10. Винтовая лестница в квадратной лестничной клетке.

В.Р. Бернгард 1903 г. [3]

Fig. 10. Spiral staircase in a square stairwell. W.R. Berngard 1903 [3]

назначали от 0,45 до 0,48 саженой (0,9–1 м), между поручнем и стеной или другим поручнем оставляли расстояние не менее 6,5–7 см [3].

### Деревянные лестницы в застройке Томска

Для изучения деревянных лестниц в зданиях и сооружениях Томска и их сравнения с историческими конструктивными решениями, применявшимися в Российской империи того же периода, было выбрано несколько зданий. Устройство наружной лестницы рассмотрено на примере жилого дома на ул. Розы Люксембург, 43, построенного в начале XX в. Это длинная лестница, ведущая сразу на второй этаж, почти 6 м в длину вместе с крыльцом. Ширина марша – 1300 мм, проступь – 280 мм с «каблучком», подступенок – 200 мм. Ступени выше нормативных значений, что, скорее всего, было обусловлено длиной лестницы, не позволявшей разместить более пологий марш. Количество ступеней – 19, что больше рекомендованных значений для одного марша (15). Данная лестница полностью закрыта, но предположительно выполнена по косякам, а также имеет боковые накладки, образующие плоскости для крепления перил и небольших черепных брусков, фиксирующих проступи (рис. 11). Конструктивно данная лестница простая, *столярной сборки*.

В качестве примера внутренней лестницы выбрана лестница, расположенная в доме на ул. Дзержинского, 20. В 2012 г. в нем были проведены комплексные научные исследования специалистами «Союза реставраторов». По описаниям, в нем находились две лестницы в холодной пристройке (рис. 12). Лестницы по тетивам из брусков толщиной 9 см, что больше рекомендованных 6–8 см и, вероятно, вызвано доступностью древесины как материала в Томске. Тетивы снизу упираются в ступень, сверху – в балку площадки через пазогребень (рис. 13). Проступи – 275 мм с «каблучком», подступенки – 175 мм, ступеней 9. Ширина марша двухмаршевой лестницы – 1,39 м, одномаршевой – 1,1 м. Точеные балясины были просто вкручены в верхнюю и нижнюю ступени, а также в тетивы. Данных о соединении тетив друг с другом не сохранилось, но в остальном эта лестница представляет собой образцовый пример лестницы на тетивах *столярной сборки*, при которой подступенок примыкает к заднему торцу проступи, как, например, на рис. 9.



Рис. 11. Наружная деревянная лестница дома по ул. Розы Люксембург, 43. Фото А. Кутукова, апрель 2025 г.

Fig. 11. Wooden staircase of the house, 43, Roza Luxemburg Street. Photo by A. Kutukov, April, 2025



Рис. 12. Марш деревянной лестницы в дома по ул. Дзержинского, 20. Фото С.Е. Верховского, май 2012 г.

Fig. 12. Wooden run, 20, Dzerzhinskii Street. Photo by S.E. Verkhovsky, May 2012





Рис. 13. Верхний и нижний узлы деревянной лестницы в доме по ул. Дзержинского, 20. Фото С.Е. Верховского, май 2012 г.

Fig. 13. Upper and lower units of wooden staircase, 20, Dzerzhinskogo street. Photo by S.E. Verkhovsky, May 2012

В качестве примера *винтовой лестницы* выбрана та, что находится в музее археологии и этнографии первого корпуса Томского государственного университета, построенного в 1878–1888 гг. Лестница, согласно обследованию специалистами СИ «Сибспецпроектреставрация», сохранила большую часть исторических конструктивных элементов. Она ограничена прямоугольной лестничной клеткой, опора ступеней выполнена на центральную стойку  $\varnothing 30$  см и косоур вдоль стен (рис. 14).



Рис. 14. Винтовая лестница в лестничной клетке, квадратной в плане. Первый корпус Томского государственного университета. Фото А. Кутукова, июль 2024 г.

Fig. 14. Spiral staircase in the stairwell square. Building 1 of Tomsk State University. Photo by A. Kutukov, July 2024

Стойка диаметром больше рекомендованных 20–25 см. Стороны лестничной клетки – примерно 1,4–1,6 м. Конструкция данной лестницы совпадает с историческими решениями винтовой лестницы, в частности с описанной В.Р. Бернгардом схемой. Лестница имеет также дублирующую двухмаршевую, расположенную в противоположном углу помещения музея.

Если с конструктивной точки зрения деревянные лестницы Томска достаточно типовые, то по функционально обоснованной планировке можно выделить несколько особенностей (рис. 15).

1. Близкое расположение ко входу, часто с отдельным входом для подъема на верхние этажи, согласно данным исследований деревянных зданий Томска по следующим адресам: ул. Войкова, 23, Ачинская, 20, Пушкина, 24, 28, 40, Вершинина, 8, 10, Крылова, 4, Соляная, 9, Карла Маркса, 29, Источная, 26.

2. Частый контакт с брандмауэрной стеной, в которой делали специальную штробу, что также отражено в зданиях по адресам: ул. Пушкина, 24, Бакунина, 11, Нечевского, 18а, Загорная, 13.

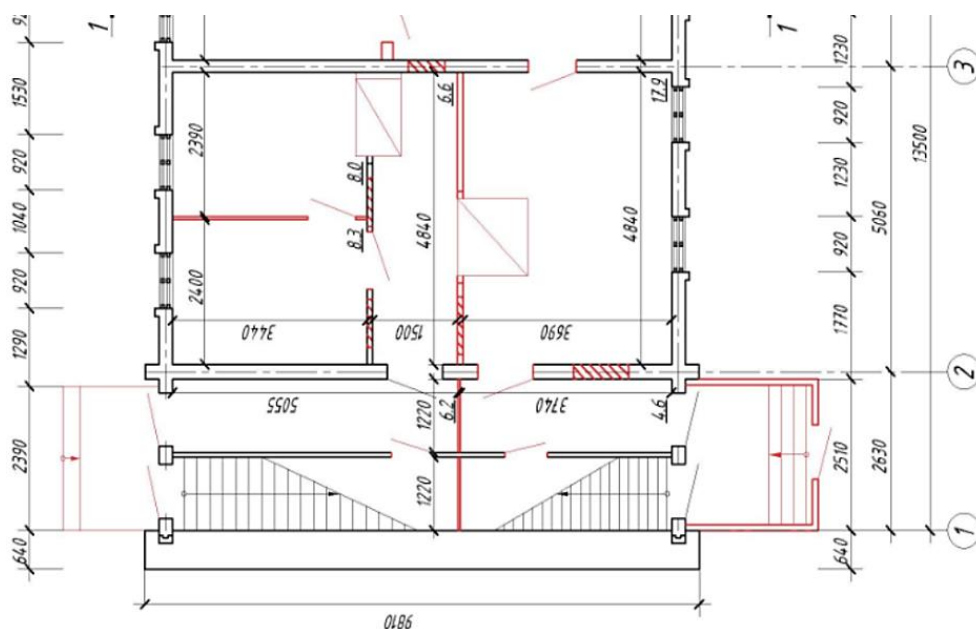


Рис. 15. План устройства лестничной клетки в двухэтажном деревянном здании на ул. Загорной, 13, в Томске, построенном в 1893 г. Выполнила Е.М. Коптева, 2022 г.

Fig. 15. Layout of stairwell in a two-storey wooden building, 13, Zagornaya Street in Tomsk, 1893. Executed by E.M. Kopteva, 2022

### Выводы

Изучение исторической литературы позволило выделить различные типы деревянных лестниц и их конструктивные особенности, знание которых способствует их правильной эксплуатации, ремонту и реставрации.

1. Деревянные лестницы подразделяли на наружные и внутренние. Отличие наружных от внутренних заключалось в повышенных требованиях к водо-

отведению со ступеней и к герметичности узловых соединений, для чего чаще выбирали конструкцию по косоурам.

2. Деревянные лестницы также подразделялись на лестницы *со вставными ступенями и с накладными*. Лестницы *со вставными ступенями* являлись более надежными с конструктивной точки зрения благодаря более жестким узловым соединениям. Лестницы с *накладными ступенями* были проще в производстве и обеспечивали естественную защиту внутренних участков от влияния осадков или других нежелательных воздействий.

3. Изучение *внутренних лестниц* в исторических зданиях Томска затруднено повышенным их износом и, следовательно, меньшей сохранностью, а также отсутствием свободного доступа для обследования. Поэтому данный вид лестниц требует дальнейшего изучения.

4. *Винтовые лестницы* встречаются значительно реже и являются вариантом конструкции по тетивам. Также винтовые лестницы дополнительно дублировались прямыми, предназначенными для переноса грузов между этажами.

5. *Лестничные клетки* устраивали в холодных прирубах, часто с отдельными входами и лестницами, начинающимися почти от самой двери.

6. При наличии брандмауэрной стены, что являлось необходимостью в рядовой деревянной застройке Томска, в стене могли выполнить штробу под монтаж ступеней.

7. Для деревянных лестниц Томска конца XIX – начала XX в. было свойственно *увеличение рекомендованных размеров* деревянных элементов, что было обусловлено доступностью древесины.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кутуков А.А., Романова Л.С., Колокольцева Е.Н. Конструкции каменных лестниц в исторической застройке на примере архитектуры Томска конца XIX – начала XX века // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 26 (5). С. 127–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-127-150. EDN: KMCZBA
2. Кириштейн Г.В. Строительное искусство. Руководство к возведению фабричных, гражданских и сельских зданий. Рига : Издание Н. Киммеля, 1899. 411 с.
3. Бернгард В.Р. Курс гражданской архитектуры. Санкт-Петербург : Тип. Ю.И. Эрлих, 1903. 495 с.
4. Залесский В.Г. Архитектура. Краткий курс построения частей зданий. Москва : Тип. т-ва И.Н. Кушнерева, 1904. 569 с.
5. Иссель Г. Внутренняя отделка зданий: устройство дверей и окон, обшивка и украшение стен, разделка потолков, устройство деревянных, каменных и железных лестниц. Санкт-Петербург : Изд. Г.В. Гольстена, 1917. 150 с.

#### REFERENCES

1. Kutukov A.A., Romanova L.S., Kolokol'tseva E.N. Stone Staircase Design in Historical Buildings in Tomsk Late in 19th and Early 20th Centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (5): 127–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-127-150. EDN: KMCZBA (In Russian)
2. Kirstein G.V. The Art of Building. A Guide to the Construction of Factory, Civil, and Rural Buildings. Riga: N. Kimmel' Publ., 1899, p. 411 (In Russian)
3. Berngard V.R. Course of Civil Architecture. Saint-Petersburg: Yu.I. Ehrlikh Publ., 1903, 495 p. (In Russian)



4. Zaleskiy V.G. Architecture. Brief Course in Construction of Parts of Buildings. Moscow: I.N. Kushnerev Publ., 1904, 569 p. (In Russian)
5. Issel G. Interior Decoration of Buildings. Petrograd: G.V. Gol'sten Publ. 1917, 150 p. (In Russian)

#### Сведения об авторах

*Кутуков Александр*, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, surolk@outlook.com

*Романова Лариса Степановна*, канд. архитектуры, доцент, советник РААСН, член ТРО СА России, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lara235@yandex.ru

*Колокольцева Евгения Николаевна*, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, djeyn.doc@gmail.com

#### Authors Details

*Aleksandr Kutukov*, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, surolk@outlook.com

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

*Evgeniya N. Kolokoltseva*, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

#### Вклад авторов

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

#### Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 27.05.2025  
Одобрена после рецензирования 19.06.2025  
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 27.05.2025  
Approved after review 19.06.2025  
Accepted for publication 26.06.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 128–144.

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 (5): 128–144.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711-1

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-128-144

EDN: PBHMQO

# СИМБИОТИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА: КАК ГОРОДА ВЫЖИВАЮТ САМИ ПО СЕБЕ

Ульфат Елькин Алескеров

*Азербайджанский архитектурно-строительный университет,  
г. Баку, Азербайджан*

**Аннотация.** *Актуальность.* Современный город развивается не только по плану, но и через спонтанные формы архитектурной адаптации, такие как симбиотическая архитектура – нелегальные надстройки и пристройки, становящиеся устойчивой частью среды. В условиях управленческой инертности и социального давления они выполняют важные функции и отражают способность к самоорганизации. В постсоветских городах, включая города Азербайджана, этот феномен пока слабо изучен.

*Цель исследования:* выявить причины возникновения симбиотической архитектуры, ее функции и значение как формы городской адаптации, а также рассмотреть ее роль в рамках неформального урбанизма с акцентом на постсоветский контекст.

*Материалы и методы.* В качестве теоретической базы использованы труды по архитектурной теории, урбанистике, социологии пространства и городской экономике (работы М. Серра, Й. Фридмана, Ф. Рахма и др.). Применены методы сравнительного анализа, визуальной типологии, пространственного наблюдения и контекстуальной интерпретации. Исследование базируется на эмпирических данных по городам Азии, Латинской Америки, Европы и постсоветского пространства (Москва, Баку и др.).

*Результаты.* Выделены основные типологии симбиотической архитектуры по пространственному положению, функции (жилищной, коммерческой, социальной) и степени легализации. Установлено, что она возникает как ответ на дефицит инфраструктуры, жилья и экономических ресурсов, становясь адаптивным элементом городской среды. На примерах Москвы и других городов показано, как такие образования могут интегрироваться в городской код или исчезать.

*Выводы.* Симбиотическая архитектура является индикатором жизнеспособности урбанистической системы в условиях неэффективного планирования. Она выступает формой архитектуры выживания и может играть роль в реорганизации городского пространства. Вместо категоричного отрицания ее стоит рассматривать как потенциальный ресурс устойчивого и инклюзивного развития города, особенно в переходных обществах и условиях пространственного дефицита.

**Ключевые слова:** симбиотическая архитектура, неформальный урбанизм, Баку, легализация, реновация, устойчивое развитие, городская трансформация

**Для цитирования:** Алескеров У.Е. Симбиотическая архитектура: как города выживают сами по себе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 128–144. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-128-144. EDN: PBHMQO

## ORIGINAL ARTICLE

## SYMBIOTIC ARCHITECTURE: HOW CITIES SURVIVE ON THEIR OWN

Ulfat Elkin Alasgarov

*Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan*

**Abstract.** Contemporary city develops not only through formal planning but also spontaneous architectural forms, such as symbiotic architecture—unauthorized extensions and add-ons that become stable elements of the urban environment. Under conditions of managerial inertia and social pressure, these structures fulfill important functions and reflect the city capacity for self-organization. In post-Soviet cities, including those in Azerbaijan, this phenomenon remains understudied.

**Purpose:** The aim is to identify the reasons for the emergence of symbiotic architecture, its functions and significance as a form of urban adaptation and examine its role within informal urbanism with a focus on the post-Soviet time.

**Methodology:** Architectural theory, urban studies, spatial sociology, and urban economics (including research by M. Serra, J. Friedman, F. Rahma). The comparative analysis, visual typology, spatial observation, and contextual interpretation. Empirical data are used on cities in Asia, Latin America, Europe, and the post-Soviet space, including Moscow, Baku, and Istanbul.

**Research findings:** Key typologies of symbiotic architecture are identified by spatial positioning, function (residential, commercial, social), and legalization. It is shown that such architecture emerges in response to shortages of infrastructure, housing, and economic opportunities, becoming an adaptive element of the urban environment. Examples from Moscow and other cities demonstrate how these structures may either integrate into the urban fabric or be subject to removal.

**Value:** Symbiotic architecture serves as an indicator of the urban system's resilience under conditions of inefficient planning. It represents a form of survival architecture and may contribute to reorganization of urban space. Rather than being categorically dismissed, it is regarded as a potential resource for sustainable and inclusive urban development, especially in transitional societies and context of spatial scarcity.

**Keywords:** symbiotic architecture, informal urbanism, Baku, legalization, renovation, sustainable development, urban transformation

**For citation:** Alasgarov U.E. Symbiotic Architecture: How Cities Survive on Their Own. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (5): 128–144. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-128-144. EDN: PBHMNO

Город – это не только упорядоченная структура зданий, улиц и услуг, проектируемая архитекторами и управляемая местными властями. Это также поле для непрерывной адаптации, компромиссов и выживания. В условиях урбанистической плотности, экономической сдержанности и управленческой инертности возникают формы архитектуры, которые официально не предусмотрены, но фактически становятся неотъемлемыми частями городской ткани [1]. Эти феномены – надстройки, пристройки, временные сооружения, нелегальные поселения – принято относить к так называемой симбиотической архитектуре.

Под симбиотической архитектурой в настоящей работе принимаются архитектурные образования, возникающие без санкций, вопреки генеральному плану, но в ответ на конкретные социальные, бытовые или экономические потребности. Такие объекты не создаются по требованию заказчиков, девелоперов или государства, они – результат локальной инициативы, вынужденной или

изобретенной. Именно в этих формах – в киосках, пристроенных к вестибюлям метро, в надстроенных мансардах, в вынесенных балконах, превращенных в жилые комнаты, проявляется способность города самоорганизовываться [2].

Согласно исследованию UN Habitat (2022 г.), до 30 % городской застройки в странах Глобального Юга формируются вне формальной строительной политики. В мегаполисах Азии, Латинской Америки и Африки симбиотические архитектурные элементы становятся не временным исключением, а устойчивой нормой [3]. Однако и в странах с развитым градостроительным контролем (в Европе, Америке и пр.) наблюдаются аналогичные тенденции – пусть и в менее масштабной, но не менее значимой форме [4]. Не обошла эта проблема стороной и города Азербайджана.

Данный феномен заслуживает внимания не только с точки зрения архитектурной критики, но и как индикатор адаптивности города к вызовам современности. Можно ли считать такие объекты «архитектурными паразитами» – или это, напротив, симптомы живучести урбанистической системы? Каковы социальные, экономические и пространственные предпосылки их возникновения? И как они влияют на восприятие города?

Целью настоящего исследования является анализ симбиотической архитектуры как формы городской адаптации, выявление причин её возникновения, функций и потенциальной роли в контексте неформального урбанизма. Особое внимание уделяется постсоветскому пространству, как полю сложных социальных и градостроительных трансформаций.

Феномен симбиотической архитектуры находится на пересечении нескольких исследовательских полей – урбанистики, архитектурной теории, социологии городского пространства и городской экономики [5]. Его нельзя рассматривать исключительно как нарушение норм – напротив, многие теоретики подчеркивают важность таких архитектурных форм как индикаторов социального напряжения и неэффективного градостроительного планирования [6, 7, 8].

Необходимо отметить, что в теории архитектуры часть специалистов называет обсуждаемое явление «паразитным». В данном контексте «паразит» означает объект, существующий за счет и во вред на теле другого – «хозяина». В 1990-х гг. французский архитектор Филип Рахм использовал термин «architecture parasite», описывая временные и легкие конструкции, которые присоединяются к существующим зданиям. При этом он подчеркивал не только зависимость, но и адаптивность, автономность этих объектов.

В более широком смысле, как отмечает Мишель Серр в своей работе «La Parasite» (1980 г.), так называемый «паразит» может быть не только разрушителем, но и медиатором: он нарушает порядок, но также создает новую форму взаимодействия. В этом контексте симбиотическая архитектура – не обязательно маргиналия, а потенциальный элемент реорганизации городской среды.

Объект исследования можно рассматривать в рамках концепции неформального урбанизма (informal urbanism), который активно развивается в работах таких исследователей, как Джон Тенер и Анабель Варгас. Они подчеркивают, что неформальное строительство – это не отклонение от нормы, а альтернативная форма архитектурной практики, основанная на самоорганизации и потребностях низовых сообществ.

Симбиотическая архитектура здесь становится одной из форм архитектуры выживания (architecture of survival), как писал Йона Фридман. Это – архитектура, не запроектированная, а возникающая «снизу» в ответ на дефицит пространства, жилья или инфраструктуры. Она характеризуется часто несанкционированными решениями.

С точки зрения теории сложных систем современный город можно рассматривать как нелинейную самоорганизующуюся структуру. Исследования, основанные на работах Кевина Линча, Мануэля Кастельса и Мэтью Ганьона, подтверждают, что неформальные архитектурные образования выступают как формы локальной регуляции и городского метаболизма. В этом контексте симбиотическая архитектура – не симптом деградации, а механизм регенерации.

Симбиотическая архитектура отличается высокой вариативностью: она проявляется в разных масштабах, материалах, целях и контекстах. Для аналитических целей можно классифицировать ее:

**1. По пространственному отношению к хозяину** (надстроечные элементы, пристройка к фасадам, подвальные и иные «подземные» пространства).

*Надстроечные элементы* в виде незаконных мансард, дополнительных этажей, крышных модулей. Они располагаются в многоквартирных домах в постсоветских и азиатских мегаполисах и, как правило, выполняют функцию расширения жилплощади, сдачи в аренду, создания самостоятельных жилых единиц.

*Пристройки к фасадам* в виде балконов, «врастание» киосков в здания. Как правило, средой распространения являются жилые массивы 1960–80-х гг. Функционально это помещения складов, кухни, мастерские, магазины.

*Подвальные или подуличные пространства* в виде подвальных магазинов, кафе, пунктов ремонта. Служат для коммерциализации «лишних» пространств.

**2. По функциям** (жилищная симбиотика, коммерческая симбиотика, социально-коммунальная симбиотика).

*Жилищная симбиотика* в виде «гробовых квартир» в Гонконге, реконструированных чердаков в пятиэтажных домах в Баку, Москве. Мотивацией для появления подобного жилья служит недостаток жилья, особенно в густонаселенных районах.

*Коммерческая симбиотика* в форме торговых палаток у станций метро, автомоек во дворах. Их особенностью является быстрая способность адаптироваться к пешеходным пространствам и транспортной инфраструктуре.

*Социально-коммунальная симбиотика* в виде самодельных навесов, уличных скамеек, неформальных остановок, которые появляются из-за дефицита общественной инфраструктуры.

**3. По степени легализации** (нелегальная, полуполегалная архитектура, реабилитированная симбиотика).

*Нелегальная архитектура* возникает стихийно, без разрешения на строительство и часто подлежит сносу, но может существовать десятилетиями (нелегальные индивидуальные дома или небольшие торговые здания).

*Полуполегалная или временно терпимая архитектура* формально вне закона, но игнорируется властями. Примерами могут служить гаражи на месте зеленых насаждений, киоски с устаревшими разрешениями и пр.

*Реабилитированная симбиотика* наблюдается, когда бывшие «паразиты» становятся нормой или частью городского кода. Примерами служат пристройки, интегрированные в капитальный ремонт.

Москва – наглядный пример симбиотической архитектуры, выросшей на стыке советской унификации и рыночной самостоятельности 1990-х гг. К началу XXI в. город столкнулся с резким дефицитом коммерческих и жилых площадей при отсутствии механизма быстрой легализации малого строительства. Основные формы симбиотической архитектуры в городе: 1) балконная экспансия с превращением балконов в жилые модули с остеклением, утеплением и увеличением площади; 2) гаражная урбанизация с организацией металлических боксов, используемых не только для автомобиля, но и как склады, мастерские и офисы; 3) торговые пристройки в виде временных киосков и павильонов, образовавших плотные торговые ансамбли около станций метро [9]. Так, на станции метро «ВДНХ» до реконструкции находился крупнейший в городе кластер «паразитной» торговли, включающий сотни модульных киосков. В 2016 г. они были демонтированы в рамках борьбы с самостроем. Все это позволяет утверждать, что особенностью симбиотической архитектуры в Москве является возникновение ее как формы неформального рыночного урбанизма, дополняющего медленно реагирующую систему городского регулирования [10].

Стамбул исторически развивался в условиях недостатка официального жилья и слабого градостроительного контроля. Симбиотическая архитектура здесь не маргинальная, а массовая. Основными формами симбиотической архитектуры являются: 1) самострой на окраинах города, именуемый *геджегонду* («построенные за ночь»), где дома нередко вырастали до нескольких этажей; 2) кровельные модули и надстройки, представляющие собой незаконные дополнительные этажи; 3) фасадные пристройки в виде ресторанов, магазинов, жилья, как правило, встроенные в структуру исторического здания. К примеру, в историческом районе Фатих сформировался плотный конгломерат из легальной и симбиотической архитектуры, где трудно провести четкую грань между формальной и неформальной застройкой. Таким образом, в отличие от Москвы, в Стамбуле симбиотическая архитектура представляет собой органическую часть роста города, которая в каком-то смысле восполняет пробелы в планировании [11].

Напротив, в Гонконге – одном из самых «плотных» городов мира – «паразитизм» является следствием сверхплотности и становится вынужденной стратегией существования. Основные формы симбиотической архитектуры в Гонконге: 1) кровельное жилье (roof housing), представляющее собой сооружения из жести и дерева на крышах многоквартирных домов; 2) капсульные квартиры или «гробовые дома» в виде сегментированных жилых ячеек площадью 1,5–2,0 м<sup>2</sup>; 3) промежуточные пространства, такие как жилье в подъездах, под лестницами, в вентиляционных шахтах. В 2013 г. правительство установило, что около 200 000 чел. проживают в условиях субстандартного или «паразитного» жилья. Поэтому Гонконг – пример симбиотической архитектуры как крайней адаптации к системному кризису доступного жилья [12] (рис. 1).

В Рио-де-Жанейро в Бразилии симбиотическая архитектура имеет свои особенности: вертикальное наращивание, где дома часто достраиваются этаж за этажом в хаотичном порядке; ультраплотность и отсутствие формального



зонирования; эстетика «архитектуры без архитектора», сложившаяся в результате накопления поколениями знаний и адаптаций. Фавелы – это не просто «паразитные» приращения к городу, а целые параллельные урбанистические системы [13]. Возникая как нелегальные поселения на склонах холмов и окраинах, они со временем обретают структуру, уличную сеть, магазины, школы, системы безопасности (иногда под контролем преступных группировок) [14]. Таким образом, фавела является формой органической урбанизации, которая существует вне официальной архитектурной логики, но обеспечивает жильем миллионы людей [15, 16] (рис. 2).



Рис. 1. Трущобы Гонконга<sup>1</sup>  
Fig. 1. Slum in Hong Kong

<sup>1</sup> URL: <https://www.alamy.com/stock-photo-hong-kong-public-slum-estate-at-day-140133025.html>

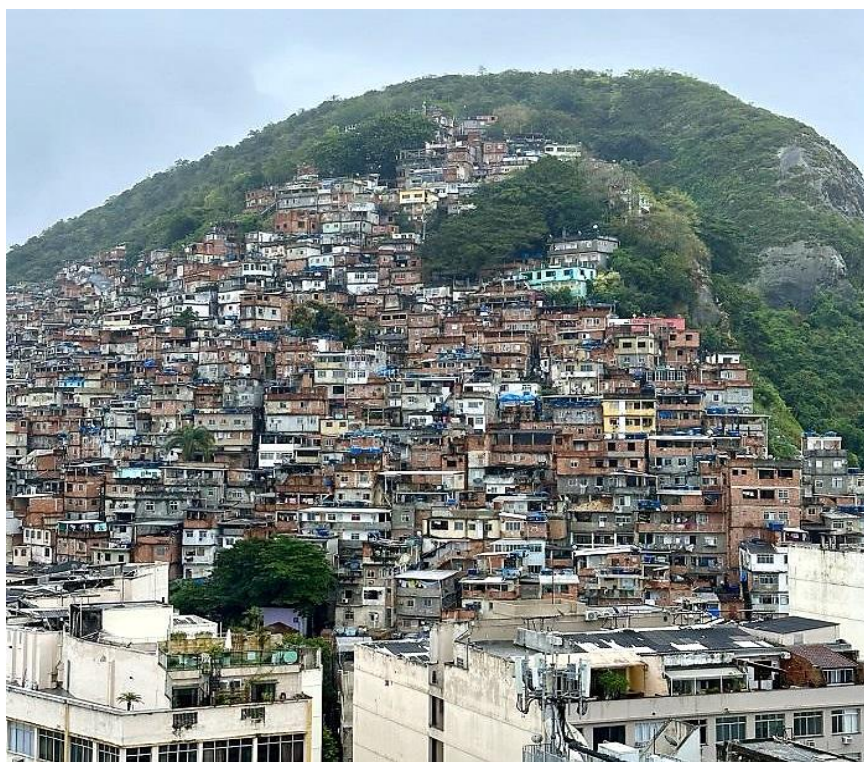


Рис. 2. Фавела Кантагалу, Рио-де-Жанейро<sup>2</sup>

Fig. 2. Favela Cantagalo, Rio de Janeiro

Город Лагос (Нигерия) также демонстрирует экстремальные формы симбиотической архитектуры, включающие плавучие поселения, такие как Макоко, построенные на сваях в лагуне (рис. 3). Эти районы создаются мигрантами и бедными слоями населения, не имеющими доступа к земле. Особенности таких поселений является их плотность (до 500 000 чел. без правового статуса). Это «архитектура» из металла, дерева и пластиковых контейнеров. Школы, церкви и рынки в таких поселениях располагаются на воде. Несмотря на то, что такие поселения часто подвергаются насильственному сносу, они время от времени снова появляются в силу дефицита городской инфраструктуры и слабой градостроительной политики, представляя собой своего рода плавучую и горизонтальную архитектуру-контрсистему [17].

В Филиппинах Манила страдает от наводнений, перегрузки транспорта и постоянного жилищного кризиса. В ответ на это возникает симбиотическая архитектура в зонах высокого риска под мостами, вдоль дамб, на обочинах автострад. Эта «архитектура» представлена жильем из мусора, тканей, фанеры, а также неформальным жильем и торговыми структурами на возвышенных сваях. Она отличается быстрой мобильностью, т. к. эти поселения могут исче-

<sup>2</sup> URL: <https://diletant.media/articles/45371460/>



зять и восстанавливаться за считанные дни. Таким образом, симбиотическую архитектуру Манилы можно назвать короткоживущим организмом, существующим на грани исчезновения, но крайне устойчивым к кризисам.



Рис. 3. Плавающее поселение Макоко, Лагос, Нигерия<sup>3</sup>

Fig. 3. Makoko floating settlement, Lagos, Nigeria

В Индии симбиотическая архитектура существует в масштабах, сравнимых с отдельными городами. Особенно наглядно это в Мумбаи и Дели, где каждый квадратный метр имеет значение. Подобная архитектура распространена в форме трущоб (Дхарави в Мумбаи является одним из крупнейших неформальных районов мира), навесов и конструкций из подручных материалов вдоль дорог, под мостами и на крышах домов [18]. Нередко такая «архитектура» встречается в форме инфильтраций в правительственные или транспортные постройки, где живут или работают множество людей. В Мумбаи часть платформ железной дороги заселена «архитектурными паразитами» – торговыми рядами, крошечными офисами, жилищами. Это позволяет утверждать, что индийская симбиотическая архитектура является неотъемлемой частью городской системы и часто более эффективна в плане ресурсного использования, чем формальные структуры.

В силу исторического развития и особенностей формирования планировочного развития г. Баку имеет некоторые схожие черты с симбиотической архитектурой Стамбула и городов постсоветского пространства.

Здесь и балконная экспансия с превращением балконов в жилые модули с остеклением, и гаражная урбанизация с металлическими, а нередко и каменными боксами [19]. Неформальные поселения и геджегонду небольшими рай-

<sup>3</sup> URL: <https://spletnik.ru/160490-trushcoby-mira-post-dlya-redaktcii-265367>

онами вклиниваются в плотность города. Они образовались в разные периоды формирования города начиная с XIX в. и продолжили свое развитие на окраинах города вне его предела в 1990-х гг. Город обзавелся стихийной архитектурой на стыке советского наследия и капиталистической трансформации. Симбиотическая архитектура проявляется как продолжение советской культуры самостроя, усиленной рыночной трансформацией и слабым контролем за застройкой. Основные формы симбиотической архитектуры здесь проявляются в виде фасадных пристроек в многоэтажных зданиях, таких как стеклянные «веранды», выступающие балконы, часто стихийно пристроенные к фасадам зданий советского времени (рис. 4). Помимо этого, встречаются надстройки на хрущевках и сталинках в виде незаконных этажей и перестройках крыш. Также имеются примеры вкрапления временной коммерции, например мини-магазины и точки уличной торговли, встроенные под арки, подвалы и дворы. Таким образом, симбиотическая архитектура Баку – пространственная форма адаптации к быстрой приватизации и неравномерному экономическому развитию.



Рис. 4. Вынос балконов и пристройка гаражей<sup>4</sup>  
Fig. 4. Removal of balconies and garage annexes

<sup>4</sup> URL: <https://turbinatravels.com/guide/Nakhitchevan-Azerbaydzhan-131426/Zametki/Nakhitchevan-gorod-udivitelnykh-balkonov-54589/photo1372083/#>

### «Паразит» или симбиот? Архитектура как форма городской адаптации

Традиционная симбиотическая архитектура воспринимается как негативный феномен: как несанкционированное, уродующее пространство вмешательство, создающее хаос и являющееся небезопасным. Однако такой подход оказывается односторонним и игнорирует одну из ключевых функций «паразитных» форм, а именно адаптивную компенсацию провалов в планировании.

«Паразитные» структуры почти всегда возникают в условиях недостатка жилья, инфраструктуры, рабочих мест. Они восполняют то, чего не предоставила официальная система, выполняя в этом смысле функцию обратной связи между городом и его жителями. Если балконы превращаются в кухни, то это является сигналом к тому, что квартирный модуль не соответствует реальным потребностям. Если торговля у метро выстраивается в плотный ряд, это означает, что спрос на уличную коммерцию превышает заложенные нормативные параметры [20].

Многие «паразитные» элементы временные лишь по названию. Они становятся устойчивыми частями городской среды. Более того, они обладают качествами, которых лишены официальные проекты: они гибкие, быстро адаптируемые и низкоресурсные. Именно такие качества становятся критически важными в условиях климатических и экономических кризисов [21].

Симбиотическая архитектура нередко становится единственным способом «вписаться» в город для маргинальных групп: мигрантов, малоимущих, работников неформального сектора. Вместо того чтобы выдавливать их на периферию, эти формы позволяют им оставаться в пределах городской активности. Тем самым «паразита» обеспечивает социальную связность, которая часто недоступна при формальном подходе.

Если следовать логике биологических аналогий, используемых в ранее обозначенной концепции «паразитной» архитектуры, то «паразитизм» подразумевает ущерб для «хозяина». Однако в реальности города мы видим другое: город и его «паразиты» часто находятся в отношениях симбиоза. Они дополняют друг друга. Более того, со временем «паразит» может быть включен в организм – через легализацию, реновацию или интеграцию.

Ниже приведены примеры таких успешных проектов превращения стихийного в официальное (рис. 5–7). В Старом городе (Ичери Шехер) в Баку имеется множество примеров пристроек к памятникам архитектуры (рис. 8). В Насиминском, Ясамальском и других районах города часто можно видеть самовольные надстройки, сделанные жильцами в 1990–2000 гг. Часть конструкций была узаконена после реконструкции и адаптации под жилье или торговлю. Некоторые объекты в Старом городе были интегрированы в общую туристическую структуру. В некоторых случаях власти предлагали унифицированную отделку фасадов или встраивание в новые проекты при реконструкции дворов. Весьма успешные варианты надстроек и дополнительных этажей можно наблюдать также на основных проспектах и улицах города (рис. 9).

Один из крупнейших «паразитов» на теле Мумбая – район Дхарави, где живет до 1 млн чел. В 2004 г. был запущен проект Dharavi Redevelopment Project (DRP), направленный на переселение и легализацию жителей. Часть их полу-

чила новое жилье в многоэтажных зданиях с инфраструктурой. Архитекторами предложен не снос, а реконструкция на месте с учетом микробизнесов и локальной экономики. В результате применили метод комбинации – частично реновация, частично «мягкая» интеграция [22].

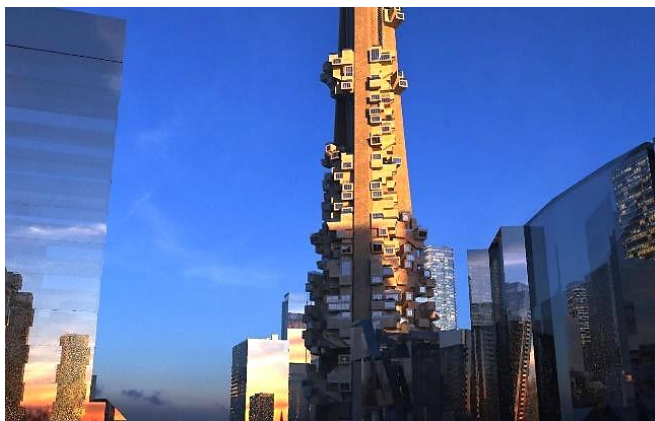


Рис. 5. Симбиотическая архитектура Си-Эн Тауэр, Канада<sup>5</sup>  
Fig. 5. Symbiotic architecture of CN tower, Canada



Рис. 6. Карман активного сопротивления, разработанный Стивенем Малкой, представляет собой модульную систему жилья, прикрепленную к внутренним стенам Большой Арки, которая развивается органически<sup>6</sup>  
Fig. 6. The active resistance pocket designed by Stephen Malka, is a modular housing system attached to the interior walls of the Arche de la Défense that develops organically

<sup>5</sup> URL: <https://www.dezeen.com/2017/02/07/toronto-cn-tower-reimagined-residential-high-rise-parasitic-wooden-pods-quadrangle/>

<sup>6</sup> URL: <https://www.pinterest.com/pin/297870962839243297/>





Рис. 7. Поселение Slow Uprising было основано Ja Studio Inc. под итальянским шоссе. Ja Studio Inc. выдвинула предложение повторно использовать выведенное из эксплуатации шоссе инновационным способом, построив укрытие на наклонных пандусах под мостом<sup>7</sup>

Fig. 7. Slow Uprising settlement established by Ja Studio Inc. under an Italian highway. Ja Studio Inc. put forward a proposal to reuse the decommissioned motorway in an innovative way by building a shelter on sloping ramps under the bridge



Рис. 8. Отель Ичери Шехер в Старом городе, г. Баку<sup>8</sup>

Fig. 8. Hotel Icheri Sheher 3 in the Old City, Baku

<sup>7</sup> URL: <https://es.pinterest.com/pin/756886281164574466/>

<sup>8</sup> URL: <https://yandex.com/maps/org/208899263202/gallery/?ll=49.832369%2C40.365547&photos%5Bbusiness%5D=208899263202&photos%5Bid%5D=urn%3Ayandex%3Asprav%3Aphoto%3A13467421-2a000001911646ade8ec00239122cd6468c3&z=16>



Рис. 9. Надстройка этажей по ул. Физули, г. Баку<sup>9</sup>  
 Fig. 9. Floor superstructure on Fuzuli Street, Baku

Стихийный район Barrio San Juan de Miraflores на окраине Лимы (Перу) возник из временных построек. Власти приняли решение постепенно легализовать застройку через регистрацию права на землю, поддержку инженерных и коммунальных сетей. Сегодня часть этих районов признана официально, а архитекторы с местными жителями создают общественные центры и школы [23].

В Стамбуле (Турция) для решения проблем с «геджеконду» – районами застройки со стихийными домами, построенными за одну ночь (чтобы обойти законы), правительство начало программу массовой реконструкции ТОКІ, переселяя жителей в жилые комплексы. Некоторые архитекторы критикуют потерю локального характера, но многие проекты улучшили условия жизни.

Для частичной интеграции плавучего поселения, построенного без разрешения, известного как район Макоко (Лагос, Нигерия), архитектор Кунле Адейеми предложил проект Makoko Floating School – модульное здание на воде как прототип устойчивой архитектуры. Несмотря на снос некоторых частей Макоко, проект получил мировое признание как пример устойчивой интеграции стихийной архитектуры.

В Каракасе (Венесуэла) следующая ситуация: недостроенный небоскреб Torre David, занятый 750 семьями, известен как вертикальная трущоба. Архитекторы из Urban-Think Tank провели исследование и предложили улучшение в виде мусоропроводов и инфраструктуры. Проект стал символом адаптации и возможной легализации экстремальной неформальности.

Вопреки распространенному восприятию неформальной архитектуры как хаотичной, уродливой или «антиградоостроительной», «паразитные» структуры нередко становятся выразительными визуальными феноменами, формирующими уникальный архитектурный язык [24, 25]. Эта «эстетика необходимости» рождается не из проекта, а из практики выживания и адаптации, где

<sup>9</sup> URL: <https://news.day.az/society/1083347.html>

каждая пристройка – это ответ на конкретную потребность, будь то дополнительная спальня, торговая точка или место для хранения [14, 20].

Симбиотическая архитектура, создаваемая вне профессионального проектирования, демонстрирует живой и подвижный облик города [25]. Она противоположна модернистскому порядку – ее язык фрагментарен, эклектичен, но вместе с тем невероятно органичен [26]. В городах, где она разрастается массово, например в фавелах Рио-де-Жанейро, на крышах каирских домов, в бакинских дворах, возникает эстетика вертикального накопления: дома-слои, дома-приоски, наросты, лестницы и балконы, будто выросшие на теле зданий [27].

Эта спонтанная эстетика часто рождает непредсказуемую живописность: вариативность материалов, локальную колористику, ритмы окон и проемов [28, 29]. Такие структуры становятся объектами внимания художников, фотографов и даже архитекторов [30, 31].

### Выводы

Город как живой организм создает структуры («паразиты»), которые официально вне правил, но фактически решают конкретные задачи жителей. Это ответ на нехватку ресурсов, бюрократию или просто креативная самодеятельность.

Симбиотическая архитектура, несмотря на ее противоречивый имидж, представляет собой важное свидетельство гибкости и устойчивости городов в условиях социального давления, правовых ограничений и архитектурной стандартизации. Она возникает на стыке нужды и изобретательности, демонстрируя, как жители адаптируют пространство под собственные потребности, иногда нарушая нормы, но нередко предвосхищая будущие градостроительные тенденции. Анализ примеров из Баку, Латинской Америки, Южной Азии и Европы показывает, что «паразитные» формы могут быть не только маргинальными, но и инновационными, эстетически выразительными и функционально необходимыми.

В условиях урбанизации и миграционных процессов особое значение приобретает диалог между формальной и неформальной архитектурой. Внедрение механизмов легализации, реновации и творческой интеграции подобных объектов в официальную городскую ткань может стать шагом к более инклюзивному и устойчивому городу.

Симбиотическая архитектура не просто «живет на теле» города. Она участвует в его эволюции, напоминая, что архитектура – это не только проект, но и процесс. В этом смысле симбиотическая архитектура становится критическим зеркалом, в котором отражаются ошибки, упущения и возможности современной урбанистики. Поэтому современным городам важно переосмысливать свои «паразитные» элементы не как угрозу, а как платформу для устойчивого развития, общественного участия и архитектурного эксперимента.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Koolhaas R.* Elements of Architecture. Taschen, 2018. 2528 p. ISBN 978-3-8365-5614-9.
2. *Cruz T., Fonna F.* Socializing Architecture. Top Down/Bottom-Up. MIT Press, 2023, 584 p. ISBN 9780262545181.
3. *Abrams Ch.* Man's Struggle for Shelter in an Urbanizing World. MIT Press, 1966. 344 p.

4. *De Certeau M.* The Practice of Everyday Life. University of California Press, 1984. 229 p.
5. *Roy A.* Urban Informality: Toward an Epistemology of Planning // Journal of the American Planning Association. 2005. V. 71 (2). P. 147–158.
6. *Simone A.* City Life from Jakarta to Dakar: Movements at the Crossroads. London : Routledge, 2010. 424 p. ISBN 978-0-4159-9322-7.
7. *Turner J.F.C.* Housing by People: Towards Autonomy in Building Environments. London : Marion Boyars, 1976. 205 p.
8. *Yiftachel O.* Theoretical notes on ‘Gray Cities: the coming of urban apartheid? // Planning Theory. 2009. V. 8 (1). P. 76–87. DOI: 10.1177/1473095208099300
9. *Борисова Е.П., Ахмедова Е.А.* Мировой опыт реорганизации массовой застройки в крупнейших городах // Вестник СГАСУ. 2012. Т. 2. № 1 (5). С. 6–10. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.01.1. EDN: RFMSGL
10. *Харитонов А.Н.* Адаптация высотной застройки в структуре современного города // Архитектурные исследования. 2018. Т. 2. № 14. С. 53–57.
11. *Boano C., Astolfo G.* Informal Urbanism, city building processes and design responsibility // Urbanistica TreiQuaderni3. 2016. V. 4 (8). P. 51–60.
12. *Al Sayyad N.* Forms of Dominance: On the Architecture and Urbanism of the Colonial Enterprise. London : Routledge, 2024. 376 p. DOI: 10.4324/9781003511724
13. *Holston J.* The Modernist City: An Anthropological Critique of Brasília. Chicago : University of Chicago Press, 1989. 383 p.
14. *Holston J.* Insurgent Citizenship: Disjunctions of Democracy and Modernity in Brazil. Princeton : Princeton University Press, 2009. 416 p. ISBN 978-0-6911-4290-6.
15. *Davis M.* Planet of Slums. Verso, 2007. 228 p.
16. *Perlman J.* Favela: Four Decades of Living on the Edge in Rio de Janeiro. New York : Oxford University Press, 2010. 448 p. ISBN 978-0-19-536836-9.
17. *Gandy M.* Learning from Lagos // New Left Review. 2005. V. 33. P. 37–53.
18. *Echanove M., Srivastava R.* This is not a slum: what the world can learn from Dharavi. 2016. V. 33 (2). P. 19–24. DOI: 10.1215/07402775-3642500
19. *Незаконные пристройки – стоп-фактор в градостроительстве в Баку* // oхu.az : [сайт]. URL: <https://oxu.az/ru/obshchestvo/nezakonnye-pristrojki-stop-faktor-v-gradostroitelstve-v-baku>. (дата обращения: 14.04.2025).
20. *Rudofsky B.* Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture. New Mexico : University of New Mexico Press, 1987. 157 p. ISBN 978-0-8263-1004-0.
21. *Saieh N.* Venice Biennale 2012: Torre David, Gran Horizonte / Urban Think Tank + Justin McGuirk + Iwan Baan // ArchDaily : [сайт]. URL: <https://www.archdaily.com/269481/venice-biennale-2012-torre-david-gran-horizonte-urban-think-tank-justin-mcguirk-iwan-baan> (дата обращения: 18.02.2025).
22. *Parasitic Architecture: Not all parasites are predators* // ArchDaily : [сайт]. 2019. URL: <https://www.archdaily.com/930393/parasitic-architecture-not-all-parasites-are-predators> (дата обращения: 21.02.2025).
23. *Harvey D.* Rebel Cities: From the Right to the City to the Urban Revolution. Verso, 2019. 208 p.
24. *Awan N.* Diasporic Agencies: Mapping the City Otherwise. Farnham : Ashgate, 2016. 206 p. ISBN 1-4724-3377-7.
25. *Awan N., Schneider T., Till J.* Spatial Agency: Other Ways of Doing Architecture. London and New York : Routledge, 2011. 224 p.
26. *Brand S.* How Buildings Learn: What Happens After They’re Built. London : Penguin Books, 1995. 256 p.
27. *Lefaivre L., Tzonis A.* Critical Regionalism: Architecture and Identity in a Globalised World. London : Prestel, 2003. 160 p.
28. *McGuirk J.* Radical Cities: Across Latin America in Search of a New Architecture. Verso, 2015. 320 p. ISBN 978-1-7816-8868-7.
29. *Oosterhuis K.* Toward a new kind of building. A designer’s guide for nonstandard architecture. Rotterdam : Nai Publisher, 2010. 240 p. ISBN 978-9-0566-2763-8.
30. *Brillembourg A., Feireiss K., Klumpner H.* Informal City: Caracas Case. New York : Prestel, 2005. 360 p.
31. *Friedman Y.* Towards a Scientific Architecture. MIT Press, 1980. ISBN 978-0-2625-6019-1.

## REFERENCES

1. Koolhaas R. Elements of Architecture. Taschen, 2018. 2528 p. ISBN 978-3-8365-5614-9.
2. Cruz T., Fonna F. Socializing Architecture. Top Down/Bottom-Up. MIT Press, 2023, 584 p. ISBN 9780262545181.
3. Abrams Ch. Man's Struggle for Shelter in an Urbanizing World. MIT Press, 1966. 344 p.
4. De Certeau M. The Practice of Everyday Life. University of California Press, 1984. 229 p.
5. Roy A. Urban Informality: Toward an Epistemology of Planning. *Journal of the American Planning Association*. 2005; 71 (2): 147–158.
6. Simone A. City Life from Jakarta to Dakar: Movements at the Crossroads. London: Routledge, 2010. 424 p. ISBN 9780415993227.
7. Turner J.F.C. Housing by People: Towards Autonomy in Building Environments. London: Marion Boyars, 1976. 205 p. ISBN O-394-40902-7.
8. Yiftachel O. Theoretical notes on 'Gray Cities: the coming of urban apartheid? *Planning Theory*. 2009; 8 (1): 7–11. DOI: 10.1177/1473095208099300
9. Borisova E.P., Akhmedova E.A. World Experience of Reorganization of Mass Development in Major Cities. *Vestnik SGASU*. 2012; 2 (1b): 6–10. EDN: RFMSGL (In Russian)
10. Kharitonova A.N. Adaptation of High-Rise Development to Modern City. *Arkhitekturnye issledovaniya*. 2018; 2 (14): 53–57. (In Russian)
11. Boano C., Astolfo G. Informal Urbanism, city building processes and design responsibility. *Urbanistica TreiQuaderni*3. 2016; 4 (8): 51–60.
12. Al Sayyad N. Forms of Dominance: On the Architecture and Urbanism of the Colonial Enterprise. London: Routledge, 2024. 376 p. DOI: 10.4324/9781003511724
13. Holston J. The Modernist City: An Anthropological Critique of Brasília. Chicago: University of Chicago Press, 1989. 383 p.
14. Holston J. Insurgent Citizenship: Disjunctions of Democracy and Modernity in Brazil. Princeton: Princeton University Press, 2009. 416 p. ISBN 9780691142906.
15. Davis M. Planet of Slums. Verso, 2007, 228 p.
16. Perlman J. Favela: Four Decades of Living on the Edge in Rio de Janeiro. New York: Oxford University Press, 2010. 448 p. ISBN 978-0-19-536836-9.
17. Gandy M. Learning from Lagos. *New Left Review*. 2005; 33: 37–53.
18. Echanove M., Srivastava R. This is not a Slum: What the World can Learn from Dharavi. *World Policy Journal*. 2016; 33 (2): 19–24. DOI: 10.1215/07402775-3642500
19. Illegal annexes as a stop factor in urban development in Baku. Available: <https://oxu.az/ru/obshchestvo/nezakonnyie-pristrojki-stop-faktor-v-gradostroitelstve-v-baku> (accessed April 14, 2025). (In Russian)
20. Rudofsky B. Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture. New Mexico: University of New Mexico Press, 1987. 157 p. ISBN 978-0826310040.
21. Saieh N. Venice biennale 2012: Torre David, Gran Horizonte. Urban think tank + Justin McGuirk + Iwan Baan. Available: <https://www.archdaily.com/269481/venice-biennale-2012-torre-david-gran-horizonte-urban-think-tank-justin-mcguirk-iwan-baan> (accessed February 18, 2025).
22. Parasitic Architecture: Not All Parasites are Predators. ArchDaily, 2019. Available: [www.archdaily.com/930393/parasitic-architecture-not-all-parasites-are-predators](http://www.archdaily.com/930393/parasitic-architecture-not-all-parasites-are-predators) (accessed February 21, 2025).
23. Harvey D. Rebel Cities: From the Right to the City to the Urban Revolution. Verso, 2019. 208 p.
24. Awan N. Diasporic Agencies: Mapping the City Otherwise. Ashgate, Farnham, 2016. 206 p. ISBN 1472433777.
25. Awan N., Schneider T., Till J. Spatial Agency: Other Ways of Doing Architecture. London and New York: Routledge, 2011. 224 p.
26. Brand S. How Buildings Learn: What Happens after they're Built. London: Penguin Books, 1995. 256 p.
27. Lefavre L., Tzonis A. Critical Regionalism: Architecture and Identity in a Globalised World. London: Prestel, 2003. 160 p.
28. McGuirk J. Radical Cities: Across Latin America in Search of a New Architecture. Verso, 2015, 320 p. ISBN 9781781688687.
29. Oosterhuis K. Toward a New Kind of Building. A Designer's Guide for Nonstandard Architecture. Rotterdam: Nai Publisher, 2010. 240 p. ISBN 978-9-0566-2763-8.

30. *Brillembourg A., Feireiss K., Klumpner H. (Eds.) Informal City: Caracas Case.* New York: Prestel, 2005. 360 p.
31. *Friedman Y. Towards a Scientific Architecture.* MIT Press, 1980. ISBN 9780262560191.

#### Сведения об авторе

*Алескеров Ульфат Элькин*, доктор философии по архитектуре, доцент, Азербайджанский архитектурно-строительный университет, AZ1073, г. Баку, Азербайджан, ул. А.Султанова, 11, ulfat.alasgarov@gmail.com

#### Author Details

*Ulfat Elkin Alasgarov*, PhD, A/Professor, Azerbaijan University of Architecture and Construction, 5, Ayn Sultanov Str., AZ1073, Baku, Azerbaijan, ulfat.alasgarov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.05.2025  
Одобрена после рецензирования 17.06.2025  
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 20.05.2025  
Approved after review 17.06.2025  
Accepted for publication 26.06.2025



# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 145–159.

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 (5): 145–159.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.012.042.8.001.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-145-159

EDN: PVGYZJ

### УСЛОВНО УПРУГИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ БАЛКИ С РАСПОРОМ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Олег Григорьевич Кумпяк, Заур Рашидович Галяутдинов,  
Дауд Рашидович Галяутдинов

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

**Аннотация.** *Актуальность.* Конструирование и расчет железобетонных балочных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении требуют учета возникновения и развития реакции распора. Наличие распора может привести к значительному увеличению несущей способности и трещиностойкости балок в совокупности с применением податливых опор, которые позволяют снизить интенсивность динамического нагружения.

*Цель работы* представляет собой анализ положительной результативности установки податливых опор в распорных условно упругих изгибаемых конструкциях при интенсивном динамическом нагружении.

В работе представлен *метод* расчета железобетонных балочных конструкций в условно упругой стадии деформирования с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении, а также полученные на основании данного метода численные результаты и их анализ.

**Выводы.** Подтверждено, что прочность упругих железобетонных конструкций с распором непосредственно зависит от податливости в вертикальном направлении. Данные, полученные в работе, показывают результативность использования податливых опор в изгибаемых железобетонных конструкциях с распором при кратковременном динамическом нагружении.

**Ключевые слова:** коэффициент динамичности, динамика, распор, податливая опора, балка

*Для цитирования:* Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. Условно упругие железобетонные балки с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 145–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-145-159. EDN: PVGYZJ

## ORIGINAL ARTICLE

## CONDITIONALLY FLEXIBLE STEEL CONCRETE BEAMS WITH THRUST ON YIELDING SUPPORTS UNDER DYNAMIC LOAD

**Oleg G. Kumpyak, Zaur R. Galyautdinov, Daud R. Galyautdinov**  
*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** Design and calculation of steel concrete beams on yielding supports under dynamic loading requires considering the development of the thrust reaction that can lead to a significant increase in the bearing capacity and crack resistance of beams with yielding supports, which reduce the intensity of dynamic loading.

**Purpose:** The aim of the work is to analyze the positive effectiveness of installing yielding supports in thrust conditionally flexible beams under intense dynamic loading.

**Methodology:** The strength analysis of steel concrete beams at conditionally elastic deformation with thrust on yielding supports under the dynamic load. Numerical results are based on this method.

**Research findings:** It is confirmed that the strength of flexible steel concrete beams with thrust directly depends on flexibility in the vertical direction.

**Value:** The effectiveness is shown for yielding supports in flexible steel concrete structures with thrust under short-term dynamic loading.

**Keywords:** dynamic load, thrust, yielding support, flexible steel concrete beam, dynamic coefficient

**For citation:** Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Conditionally Flexible Steel Concrete Beams with Thrust on Yielding Supports under Dynamic Load. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 145–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-145-159. EDN: PVGYZJ

Кратковременные динамические нагрузки возникают при взрывах газо-, паро-, пылевоздушных смесей, различного рода ударных воздействиях на конструкции, а также по причине прогрессирующего обрушения элементов зданий и сооружений. Вышеотмеченные нагрузки являются однократными и носят аварийный характер; приводят к значительным материальным затратам на частичное или полное восстановление зданий или сооружений [1].

Существует отдельный класс сооружений – убежища и укрытия гражданской обороны, для которых кратковременные динамические нагрузки учитываются при их проектировании и конструировании [2]. Конструкции данных сооружений должны полностью воспринимать действующую кратковременную динамическую нагрузку. В связи с этим возрастает актуальность развития и применения активных способов защиты как отдельных конструкций, так

и зданий и сооружений в целом, позволяющих снизить интенсивность динамического воздействия и, следовательно, уменьшить финансовые затраты на строительство зданий и сооружений.

К активному способу защиты зданий и сооружений можно отнести податливые опоры [2–19]. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных балок и опертых по контуру плит на податливых опорах [4, 13–19] свидетельствуют о высокой эффективности их применения. В этом случае степень снижения динамической реакции определяется упругопластическими свойствами податливой опоры и соотношением жесткостей опоры и конструкции [4, 13, 14, 15, 21, 24, 25].

Вышеотмеченные сооружения гражданской обороны возводятся в монолитном и сборно-монолитном исполнении с жестким сопряжением конструктивных элементов и представляют собой многократно статические неопределимые системы. При динамическом деформировании, вследствие ограничения горизонтального смещения конструкций в уровне перекрытий, возникает распор, который приводит к значительному увеличению несущей способности изгибаемых элементов [20–26].

Влияние распора и вертикальной податливости опор на прочность и деформативность железобетонных балок при динамическом нагружении достаточно изучено по отдельности. Однако вопрос совместного применения податливых опор и учет распора в сооружениях гражданской обороны представляет научный и практический интерес и является актуальной проблемой.

Цель исследования заключается в оценке одновременного влияния вертикальной и горизонтальной податливости конструкций на опорах для условно упругих железобетонных балок с распором.

В исследовании изучены железобетонные балки при упругом деформировании с учетом вертикальной и горизонтальной податливости при динамическом нагружении. Развитие во времени на шаге расчета ( $s$ ) воспроизводится зависимостью

$$p(t) = p_1 - \frac{(p_1 - p_2)}{(t_2 - t_1)}(t - t_1) = p_1 - \Delta p(t - t_1), \quad (1)$$

где  $t$  – текущая координата времени;  $p_1$ ,  $p_2$  – значение нагрузки на рассматриваемом участке в начале и конце соответственно для расчетного шага ( $s$ );  $t_1$ ,  $t_2$  – значение времени на рассматриваемом участке в начале и конце соответственно.

Формула (1) дает возможность представить развитие нагрузки во времени как на нисходящем, так и на восходящем участках диаграммы, что позволяет ввести в расчет произвольную нагрузку, разбитую множеством линейных участков. Так как реакция распора изменяется в процессе деформирования, то применение шагового расчета необходимо.

В настоящей работе использован приближенный метод, который заключается в задании формы прогибов. При условно упругом деформировании балки для получения уравнения движения в условно упругой стадии применен принцип возможных перемещений (рис. 1) [21, 22, 27].

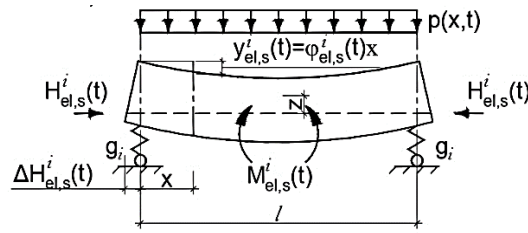


Рис. 1. Схема, заложенная в расчет для условно упругой балки с вертикальной и горизонтальной податливостью

Fig. 1. The scheme included in the strength analysis of conditionally flexible beam with vertical and horizontal compliance

$$\ddot{T}_{el,s}^i(t) + \omega_{H,el}^2 T_{el,s}^i(t) = \omega_1^2 p(t), \quad (2)$$

где  $\omega_{H,el} = \sqrt{\omega_1^2 + k / \left(1 + \frac{\pi^4}{2W_i}\right)}$  – частота колебаний балки с ограничением горизонтального смещения;  $k = \frac{4\pi^2 z^2}{cm l^3}$  – коэффициент, учитывающий влияние рас-

пора, а именно податливость в горизонтальном направлении;  $\omega_1 = \omega / \sqrt{1 + \frac{\pi^4}{2W_i}}$  –

частота колебания изгибаемой конструкции на сминаемых вставках;  $\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{B}{m}}$  – частота колебания изгибаемой конструкции на жестких опорах;  $B$  – жесткость балочной конструкции с учетом трещин в бетоне;  $m$  – погонная масса конструкции;  $p(t)$  – закон изменения нагрузки во времени;  $W_i = \frac{g_i l^3}{B}$  – параметр, характеризующий соотношение жесткостей балки и податливых опор;  $g_i$  – жесткость сминаемых вставок в  $i$ -й стадии деформирования.

При заданном законе развития нагрузки (1) во времени решение уравнения движения (2) будет иметь следующий вид:

$$T_{el,s}^i(t) = \sin(\omega_{H,el} t) A_{el,s}^i - \cos(\omega_{H,el} t) B_{el,s}^i - \frac{\omega_1 (\Delta p(t - t_1) - p_1)}{\omega_{H,el}^2}. \quad (3)$$

Неизвестные константы в выражении (3) находятся на основании начальных условий, а именно при равенстве первой производной функции динамичности и функции динамичности значениям на предшествующем шаге расчета:  $T_{el,s}^i(t) = T_{el,s-1}^i(t)$ ,  $\dot{T}_{el,s}^i(t) = \dot{T}_{el,s-1}^i(t)$  [21, 27].

Максимум функции динамичности достигается в момент времени, который определяется зависимостью  $\dot{T}_{el,s}^i(t_{\max}) = 0$  [21, 27].

Величина коэффициента динамичности в условно упругой стадии определяется выражением  $k_{d,HSY} = T_{el,s}^i(t_{\max})$  [21, 27].

Перемещения податливых опор в зависимости от стадии их деформирования для балок в условно упругой стадии определяются выражениями:

– упругая:

$$u_{el,s}^{el}(t) = \frac{pl}{2g_{el}} T_{el,s}^{el}(t);$$

– упругопластическая:

$$u_{el,s}^{pl}(t) = \frac{pl}{2g_{pl}} T_{el,s}^{pl}(t) + \left(1 - \frac{g_{el}}{g_{pl}}\right) u_{el}^{pl}(t_{SY,el});$$

– упругопластическая с отвердением:

$$u_{el,s}^h(t) = \frac{pl}{2g_h} T_{el,s}^h(t) + \left(1 - \frac{g_{pl} - g_{el}}{g_h}\right) u_{el}^{el}(t_{SY,el}) + \left(1 - \frac{g_{pl}}{g_h}\right) u_{el}^{pl}(t_{SY,pl}).$$

Методика расчета заключается в циклическом расчете на каждом этапе условно упругих железобетонных балок с горизонтальной и вертикальной податливостью при интенсивном динамическом воздействии. На каждом шаге расчета определяется функция динамичности железобетонной балки на податливых опорах, при этом учитывается фактическая величина реакции распора в зависимости от угла поворота балки [21, 27].

Оценка распора выполнялась по величине  $c_1$ , характеризующей соотношение продольной жесткости балки к жесткости конструкции, препятствующей горизонтальному смещению, и определяется зависимостью  $c_1 = cE_b b h_0 / l$ .

Для железобетонных балок на податливых опорах под действием мгновенно нарастающей динамической нагрузки установлено уменьшение коэффициента динамичности, которое связано со снижением временно частотной характеристики  $(\omega\theta)$  (рис. 2, а). Стоит отметить, что при минимизации соотношения жесткостей сминаемой вставки и балочной конструкции наблюдается снижение перемещений и усилий по сравнению с балками на жестких опорах [Там же]. Влияние степени податливости конструкции в горизонтальном направлении при отсутствии возможности ее вертикального смещения на опорах представлено на рис. 2, б, при этом снижение коэффициента динамичности условно упругих балок с распором происходит с увеличением  $\omega\theta$  и составляет до 40 %. Вышеизложенное дает возможность сделать следующий вывод: сочетание горизонтальной податливости ( $c_1$ ) и вертикальной податливости опор  $W_{el}$  (рис. 3) снижает коэффициент динамичности вне зависимости от параметра  $\omega\theta$  для изгибаемых конструкций, которые работают в условно упругой стадии, по сравнению как с балками с распором, так и с балками на податливых опорах [Там же].

При действии постепенно нарастающей динамической нагрузки при  $\theta_2 / \theta_1 = 1$  наблюдается снижение коэффициента динамичности до 48 % для условно упругих конструкций с распором со снижением параметра  $c_1$  относительно балок как на жестких опорах (рис. 4, б), так и на податливых опорах (рис. 5). Необходимо отметить, что снижение жесткости податливых опор (рис. 4, а) не приводит к уменьшению коэффициента динамичности во всем

диапазоне  $\omega\theta_1$ , при этом увеличение составляет до 50 % относительно балок на жестких опорах.

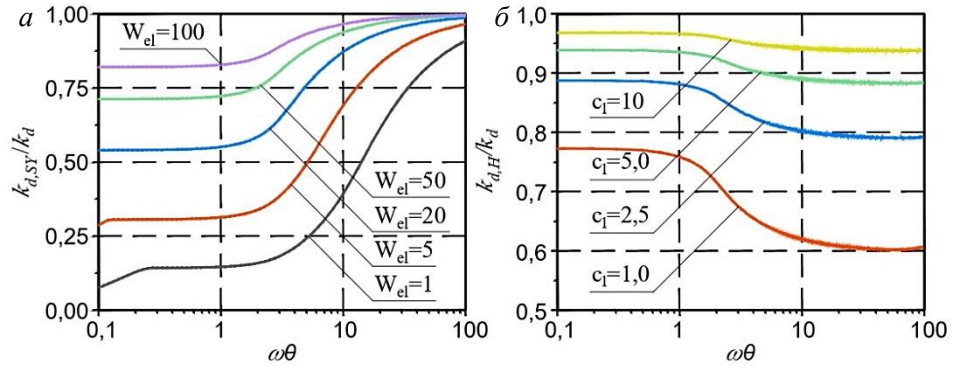


Рис. 2. Влияние на коэффициент динамичности условно упругих конструкций при действии мгновенно нарастающей нагрузки в зависимости от  $\omega\theta$ :

$a$  – упругих податливых опор;  $b$  – распора

Fig. 2. Dependences of yielding supports ( $a$ ) and thrust ( $b$ ) on the dynamic coefficient of conditionally flexible beams under instantly increasing load, depending on  $\omega\theta$

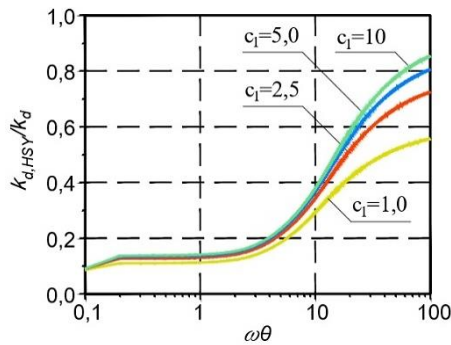


Рис. 3. Влияние распора для условно упругих балок на упругих податливых опорах  $W_{el} = 1$  при действии мгновенно нарастающей нагрузки

Fig. 3. Thrust for conditionally flexible beams on elastic yielding supports  $W_{el} = 1$  under instantly increasing load

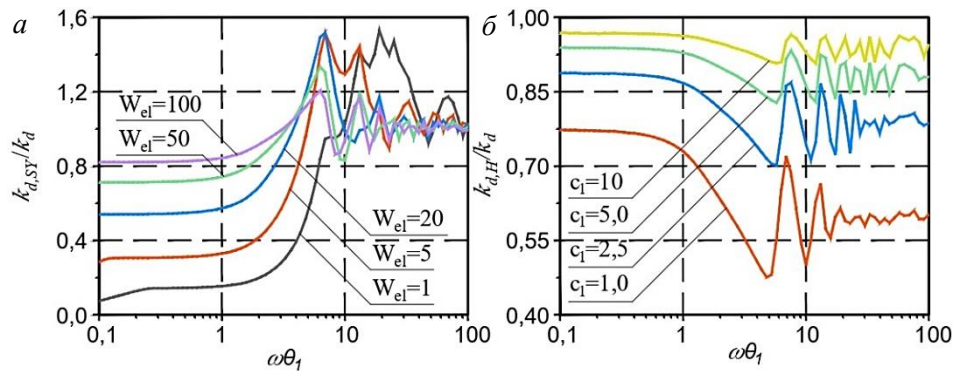


Рис. 4. Влияние на коэффициент динамичности конструкций при действии постепенно нарастающей нагрузки ( $\theta_2 / \theta_1 = 1$ ) в зависимости от  $\omega\theta_1$ :

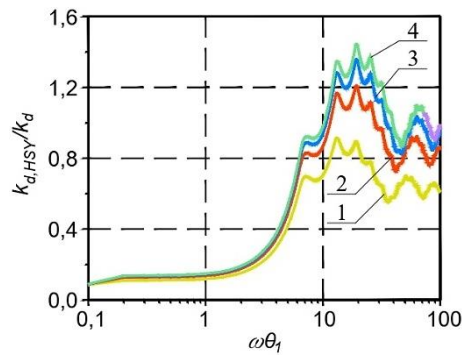
$a$  – упругих податливых опор;  $b$  – распора

Fig. 4. Elastic yielding supports ( $a$ ) and thrust ( $b$ ) affecting the dynamic coefficient under increasing load ( $\theta_2 / \theta_1 = 1$ ), depending on  $\omega\theta_1$



Рис. 5. Действие горизонтальной податливости на изгибаемые конструкции на податливых опорах, деформируемых в упругой области (при  $W_{el} = 1$ ) при нагрузке, изменяющейся по постепенно нарастающему закону при  $\theta_2 / \theta_1 = 1$  в зависимости от  $\omega\theta_1$ : 1 –  $c_1 = 1$ ; 2 –  $c_1 = 2,5$ ; 3 –  $c_1 = 5$ ; 4 –  $c_1 = 10$

Fig. 5. Horizontal compliance affecting flexible beams on yielding supports deformed in the elastic region (at  $W_{el} = 1$ ) under gradually increasing load at  $\theta_2 / \theta_1 = 1$ , depending on  $\omega\theta_1$ : 1 –  $c_1 = 1$ ; 2 –  $c_1 = 2,5$ ; 3 –  $c_1 = 5$ ; 4 –  $c_1 = 10$



Эффективность применения податливых опор в безраспорных условно упругих конструкциях при действии постепенно нарастающей нагрузки, в зависимости от соотношения  $\theta_2 / \theta_1$  (рис. 6, а), проявляется в достаточно узком диапазоне параметра  $\omega\theta_1$ , который уменьшается с увеличением жесткости опор.

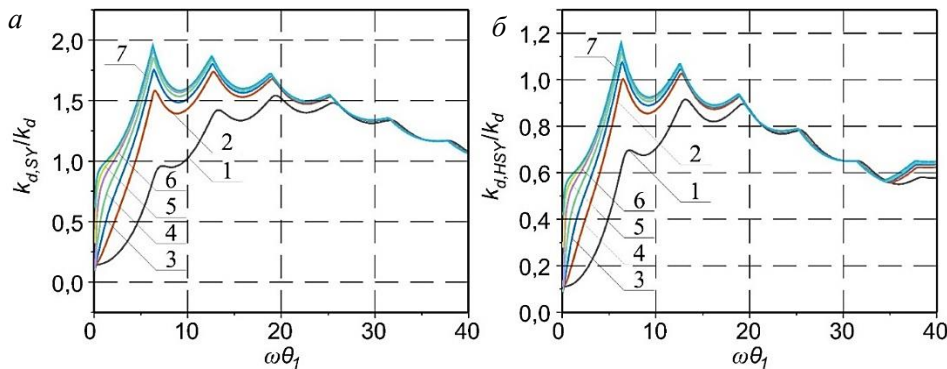


Рис. 6. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора от временно частотной характеристики  $\omega\theta_1$  при динамическом воздействии с постепенным нарастанием:

а – на податливых опорах; б – с распором на податливых опорах: 1 –  $\theta_2 / \theta_1 = 1$ ; 2 –  $\theta_2 / \theta_1 = 5$ ; 3 –  $\theta_2 / \theta_1 = 10$ ; 4 –  $\theta_2 / \theta_1 = 20$ ; 5 –  $\theta_2 / \theta_1 = 50$ ; 6 –  $\theta_2 / \theta_1 = 100$ ; 7 –  $\theta_2 / \theta_1 = 200$

Fig. 6. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust from the time-frequency characteristic  $\omega\theta_1$  under gradually increasing dynamic load:

1 –  $\theta_2 / \theta_1 = 1$ ; 2 –  $\theta_2 / \theta_1 = 5$ ; 3 –  $\theta_2 / \theta_1 = 10$ ; 4 –  $\theta_2 / \theta_1 = 20$ ; 5 –  $\theta_2 / \theta_1 = 50$ ; 6 –  $\theta_2 / \theta_1 = 100$ ; 7 –  $\theta_2 / \theta_1 = 200$

В полученных диаграммах область положительной эффективности вертикальной податливости для балок с реакцией распора и без нее соответствует значениям ординаты меньше 1, т. е.  $k_{d,sy}(k_{d,HSY})/k_d \leq 1$ . Наличие горизонтальной податливости ( $c_1$ ) в балках с вертикальной податливостью дает воз-

возможность увеличить область положительного влияния (рис. 6, б) в сравнении с балками без учета распора (рис. 6, а). При этом степень расширения области положительного влияния распора и вертикальной податливости опор зависит от горизонтальной податливости  $c_1$  и соотношения жесткостей податливой опоры и железобетонной балки  $W_{el}$ .

Для оценки перехода податливой опоры в пластическую стадию, помимо величин, учитываемых при анализе влияния упругих податливых опор на усилия и перемещения балок ( $c_1$ ,  $W_{el}$ ), также рассмотрено влияние времени перехода сминаемых вставок из упругой в пластическую стадию  $t_{SY,el} = (0,01...0,99)t_{max}$  ( $t_{max}$  – время достижения максимума функцией динамичности при упругом деформировании податливых опор) при действии мгновенно (рис. 7) и постепенно нарастающей кратковременной динамической нагрузки (рис. 8) для частотно-временной характеристики  $\omega\theta(\omega\theta_1) = 1...20$ .

При мгновенно нарастающей нагрузке область положительных значений  $k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d < 1$  наблюдается во всем спектре  $t_{SY,el}$  (рис. 7).

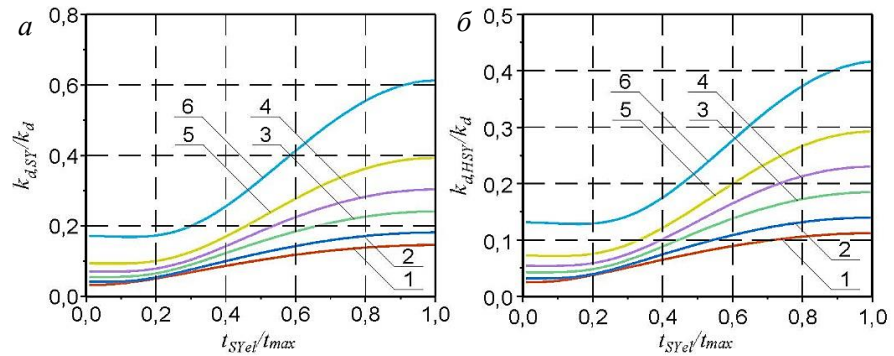


Рис. 7. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из упругой области в пластическую ( $t_{SY,el}$ ) к времени достижения максимума функцией динамичности ( $t_{max}$ ) для условно упругих железобетонных балок на податливых опорах ( $W_{el} = 1$ ) при действии мгновенно нарастающей нагрузки:

а – на податливых опорах; б – с распором на податливых опорах: 1 –  $\omega\theta = 1$ ; 2 –  $\omega\theta = 3$ ; 3 –  $\omega\theta = 5$ ; 4 –  $\omega\theta = 7$ ; 5 –  $\omega\theta = 10$ ; 6 –  $\omega\theta = 20$

Fig. 7. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on elastic-to-plastic transition time ( $t_{SY,el}$ ) and time of reaching the maximum by the dynamic function ( $t_{max}$ ) for conditionally flexible steel concrete beams on yielding supports ( $W_{el} = 1$ ) under instantly increasing load:

1 –  $\omega\theta = 1$ ; 2 –  $\omega\theta = 3$ ; 3 –  $\omega\theta = 5$ ; 4 –  $\omega\theta = 7$ ; 5 –  $\omega\theta = 10$ ; 6 –  $\omega\theta = 20$

Установлено уменьшение величины коэффициента динамичности  $k_{d,HSY}$  для распорных конструкций в зависимости от снижения величины  $c_1$ . По полученной

диаграмме можно установить время оптимального перехода опоры из упругой в пластическую стадию, которое определено границами  $t_{SY,el}^{opt} = (0,1 \dots 0,25)t_{max}$  в зависимости от параметра  $\omega\theta_1$ . Наличие ограничения в горизонтальном направлении, т. е. при  $c_1 = 1$ , дает возможность уменьшить  $k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d$  до 25 %.

При действии на балки постепенно нарастающей нагрузки влияние податливых опор на коэффициент динамичности в условно упругой конструкции носит неоднозначный характер (рис. 8). Положительный эффект ( $k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d < 1$ ) прослеживается уже не при всех значениях  $\omega\theta_1$ . Однако в изученных в работе областях  $\omega\theta_1$  имеет место быть оптимальное значение времени перехода опоры в пластическую стадию  $t_{SY,el}^{opt}$ , при которой коэффициент динамичности балок на податливых опорах без распора  $k_{d,SY}$  меньше по сравнению с балками на несмещаемых опорах. Это значит, что применение податливых опор, деформирующихся в упругой и пластической стадиях, позволяет снизить усилия и перемещения конструкции во всем диапазоне изменения параметра  $\omega\theta_1 = 1 \dots 20$ .

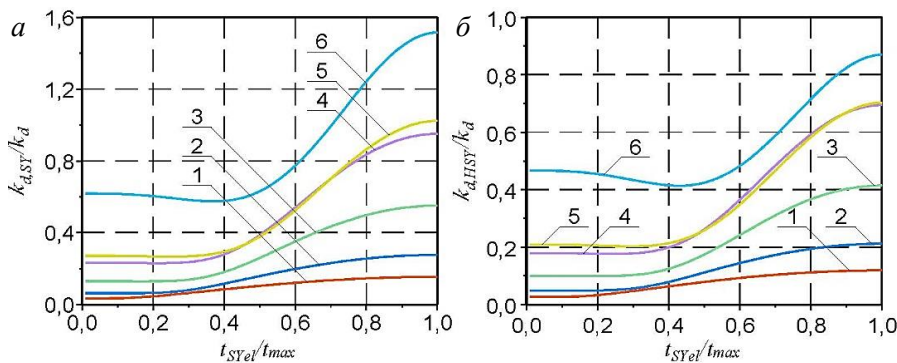


Рис. 8. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из упругой области в пластическую ( $t_{SY,el}$ ) к времени достижения максимума функцией динамичности ( $t_{max}$ ) для условно упругих железобетонных балок на податливых опорах ( $W_{el} = 1$ ) при действии постепенно нарастающей нагрузки:

$a$  – на податливых опорах;  $b$  – с распором на податливых опорах: 1 –  $\omega\theta_1 = 1$ ; 2 –  $\omega\theta_1 = 3$ ; 3 –  $\omega\theta_1 = 5$ ; 4 –  $\omega\theta_1 = 7$ ; 5 –  $\omega\theta_1 = 10$ ; 6 –  $\omega\theta_1 = 20$

Fig. 8. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on elastic-to-plastic transition time ( $t_{SY,el}$ ) and time of reaching the maximum by the dynamic function ( $t_{max}$ ) for conditionally flexible steel concrete beams on yielding supports ( $W_{el} = 1$ ) under instantly increasing load:

1 –  $\omega\theta_1 = 1$ ; 2 –  $\omega\theta_1 = 3$ ; 3 –  $\omega\theta_1 = 5$ ; 4 –  $\omega\theta_1 = 7$ ; 5 –  $\omega\theta_1 = 10$ ; 6 –  $\omega\theta_1 = 20$

Рассмотрим деформирование податливых опор в упругопластической стадии с последующим переходом в отверждение ( $i = h$ ). Для рассмотрения по-

датливых опор в стадии отвердения принято оптимальное время перехода в пластическую стадию ( $t_{SY,el}^{opt}$ ) для того, чтобы получить значения коэффициентов динамичности ( $k_{d,HSY}$ ), соответствующие максимальному снижению. Анализ выполнен по времени перехода сминаемых вставок из пластической в стадию отвердения при  $t_{SY,pl} = (0,01...0,99)t_{max}$  ( $t_{max}$  – время достижения максимума функцией динамичности при упругопластическом деформировании податливых опор) (рис. 9, 10).

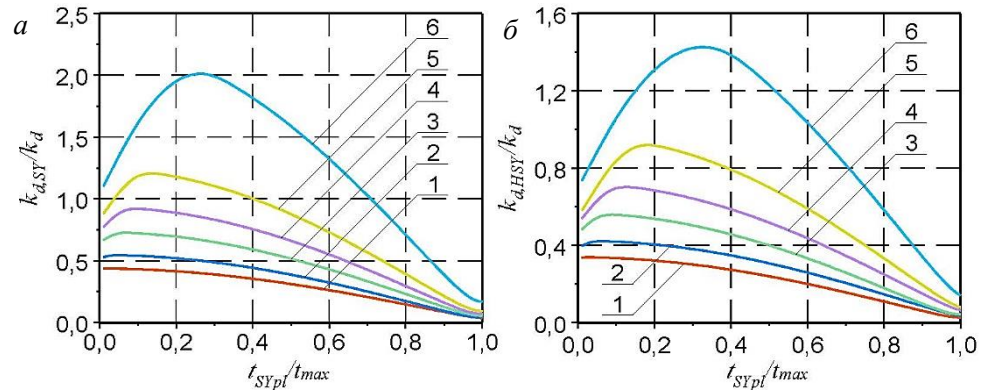


Рис. 9. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из пластической области в отвердение ( $t_{SY,pl}$ ) к времени достижения максимума функцией динамичности ( $t_{max}$ ) при действии мгновенно нарастающей нагрузки:

$a$  – на податливых опорах;  $b$  – с распором на податливых опорах: 1 –  $\omega\theta=1$ ; 2 –  $\omega\theta=3$ ; 3 –  $\omega\theta=5$ ; 4 –  $\omega\theta=7$ ; 5 –  $\omega\theta=10$ ; 6 –  $\omega\theta=20$

Fig. 9. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on plastic-to-solid transition time ( $t_{SY,pl}$ ) and time of reaching the maximum by the dynamic function ( $t_{max}$ ) under instantly increasing load:

1 –  $\omega\theta=1$ ; 2 –  $\omega\theta=3$ ; 3 –  $\omega\theta=5$ ; 4 –  $\omega\theta=7$ ; 5 –  $\omega\theta=10$ ; 6 –  $\omega\theta=20$

Переход податливых опор из пластической стадии в отвердение сопровождается резким ростом коэффициента динамичности.

Данный фактор связан с тем, что в момент перехода в стадию отвердения наблюдается уменьшение скорости балки, что приводит к повышению нагрузки на величину инерционного воздействия. При пластическом же деформировании сминаемых вставок конструкция получает дополнительное ускорение. Таким образом, на коэффициент динамичности влияют скорость балки и время перехода опоры в стадию отвердения ( $t_{SY,pl}$ ).

В конструкциях на сминаемых вставках при мгновенно нарастающей нагрузке зона выгодных значений ( $k_{d,SY}/k_d < 1$ ) установлена для всех значений  $t_{SY,pl}$  при  $\omega\theta \leq 7$ . При временно частотной характеристике более 7 ( $\omega\theta > 7$ ) раз-

вивается область отрицательного влияния распора и податливости опор на величину  $k_{d,HSY}$  (рис. 9, а). Для конструкций на податливых опорах с распором со снижением величины  $c_1$  происходит снижение коэффициента динамичности и расширение области положительного влияния для диапазона  $\omega\theta \leq 10$  (рис. 9, б).

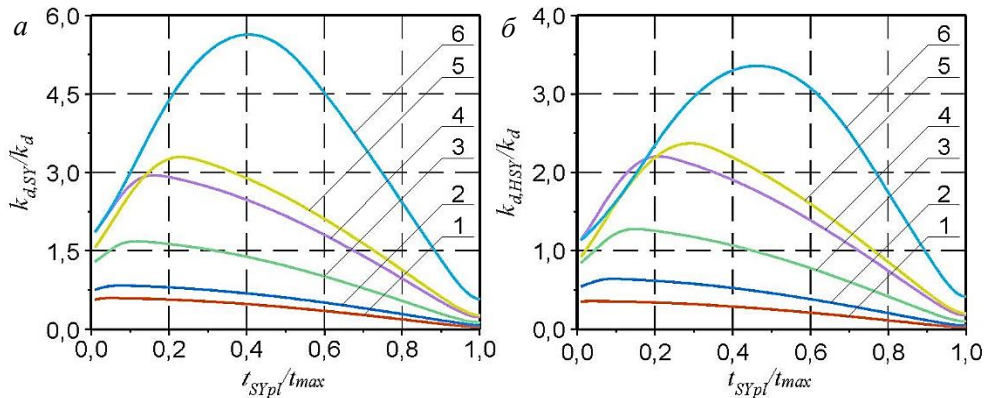


Рис. 10. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из пластической области в отверждение ( $t_{SY,pl}$ ) к времени достижения максимума функций динамичности ( $t_{max}$ ) при действии постепенно нарастающей нагрузки:

а – на податливых опорах; б – с распором на податливых опорах: 1 –  $\omega\theta_1 = 1$ ; 2 –  $\omega\theta_1 = 3$ ; 3 –  $\omega\theta_1 = 5$ ; 4 –  $\omega\theta_1 = 7$ ; 5 –  $\omega\theta_1 = 10$ ; 6 –  $\omega\theta_1 = 20$

Fig. 10. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on plastic-to-solid transition time ( $t_{SY,pl}$ ) and time of reaching the maximum by the dynamic function ( $t_{max}$ ) under instantly increasing load:

1 –  $\omega\theta_1 = 1$ ; 2 –  $\omega\theta_1 = 3$ ; 3 –  $\omega\theta_1 = 5$ ; 4 –  $\omega\theta_1 = 7$ ; 5 –  $\omega\theta_1 = 10$ ; 6 –  $\omega\theta_1 = 20$

В целом характер изменения коэффициента динамичности при постепенно нарастающей нагрузке ( $\theta_2/\theta_1 = 1$ ) (рис. 10) аналогичен мгновенно нарастающей нагрузке как для балок с распором, так и без него. В конструкциях на сминаемых вставках при постепенно нарастающей нагрузке зона выгодных значений ( $k_{d,SY}/k_d < 1$ ) установлена для всех значений  $t_{SY,pl}$  при  $\omega\theta \leq 3$ . Учет ограничения горизонтального смещения позволяет добиться уменьшения коэффициента динамичности на всем рассматриваемом интервале  $t_{SY,pl}$  и  $\omega\theta_1$  по сравнению с балками на податливых опорах без распора.

### Выводы

Ограничение горизонтального смещения для условно упругих балочных конструкций на сминаемых вставках при кратковременном динамическом воздействии при рассмотренных значениях  $\omega\theta$  ( $\omega\theta_1$ ) дает возможность повысить зону эффективности применения сминаемых вставок ( $k_{d,SY}/k_d < 1$ ) вне зависи-

мости от стадии ее работы. Выявлено, что с увеличением временно частотной характеристики  $\omega\theta(\omega\theta_1)$  эффективность от ограничения горизонтального смещения растет, а от сминаемых вставок снижается. На основании выполненной работы можно заключить, что учет реакции распора в изгибаемых конструкциях при вертикальной податливости приводит к снижению коэффициента динамичности.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.
2. СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77\*. Москва : Минстрой России, ФАУ «ФЦС», 2014. 152 с.
3. Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р., Гандзий М.В. Численно-экспериментальные исследования податливых опор при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 103–110. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-103-110
4. Галяутдинов З.Р. Прочность и деформативность железобетонных балочных и плитных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Галяутдинов Заур Рашидович. Томск, 2021. 48 с.
5. Elfetori F.A. Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical // Industrial Science and Engineering. 2013. V. 7. № 2. P. 183–186.
6. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading // Engineering Structures. 2015. № 96. P. 88–99.
7. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction // Procedia Engineering. 2011. № 14. P. 442–449.
8. Kellas S. Design, Fabrication and Testing of a Crushable Energy Absorber for a Passive Earth Entry Vehicle // NASA/CR-2002-211425. 2002. 49 p.
9. Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes // Wseas transactions on applied and theoretical mechanics. 2009. V. 4. № 3. P. 95–104.
10. Lipa S., Kotelko M. Lateral impact of tubular structure – theoretical and experimental analysis. Part 1 – Investigation of single tube // Journal of theoretical and applied mechanics. 2013. V. 51. № 4. P. 873–882.
11. Somya P., Chawalit T., Umphisak T. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes. Subjected to Bending World Academy of Science // Engineering and Technology. 2007. V. 36. P. 329–334.
12. Younes M.M. Finite Element Modeling of Crushing Behaviour of Thin Tubes with Various Cross-Sections // 13th International Conference on Aerospace Science, Aviation Technology, ASAT – 13. 2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/267254384\\_Finite\\_Element\\_Modeling\\_of\\_Crushing\\_Behaviour\\_of\\_Thin\\_Tubes\\_with\\_Various\\_Cross-Sections?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InByb2ZpbGUifX0](https://www.researchgate.net/publication/267254384_Finite_Element_Modeling_of_Crushing_Behaviour_of_Thin_Tubes_with_Various_Cross-Sections?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InByb2ZpbGUifX0) (дата обращения: 20.01.2025).
13. Галяутдинов З.Р., Кумпяк О.Г. Расчет железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 5. С. 33–41.
14. Галяутдинов З.Р., Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р., Шипилова Е.В. Динамический расчет железобетонных балок на податливых опорах за пределами упругости // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 4. С. 63–70.



15. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. 270 с.
16. Одинокопылов Г.И., Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. Определение параметров живучести защищенных ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 4. С. 110–125. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/231
17. Расторгуев Б.С. Обеспечение живучести зданий при особых динамических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 4. С. 45–48.
18. Расторгуев Б.С. Прочность железобетонных конструкций зданий взрывоопасных производств и специальных сооружений, подверженных кратковременным динамическим воздействиям : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Расторгуев Борис Сергеевич. Москва, 1987. 37 с.
19. Саид А.-Р.А. Повышение несущей способности железобетонных конструкций при взрывных воздействиях : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абдулль Рахман Абдуллах Саид. Москва, 1995. 207 с.
20. Виноградова Т.Н. Влияние распора на работу железобетонных балочных конструкций при кратковременных динамических воздействиях : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Виноградова Тамара Николаевна. Москва, 1977. 155 с.
21. Галяутдинов Д.Р. Прочность и деформативность железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении на податливых опорах : специальность 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галяутдинов Дауд Рашидович. Томск, 2023. 24 с.
22. Галяутдинов Д.Р. Прочность и деформативность железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении на податливых опорах : специальность 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галяутдинов Дауд Рашидович. Томск, 2023. 221 с.
23. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Крылов С.М. Новое о прочности железобетона. Москва : Стройиздат, 1976. 272 с.
24. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. Влияние распора на прочность железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Известия вузов. Строительство. 2023. № 1. С. 5–16. EDN: JCUIVA
25. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Экспериментальные исследования опертых по контуру железобетонных плит с распором // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 113–120.
26. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. Москва : Стройиздат, 1964. 151 с.
27. Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р. Метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 5. С. 81–97. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97

## REFERENCES

1. Birbrayer A.N., Roleder A.Yu. Extreme Impacts on Structures. Saint-Petersburg, 2009. 594 p. (In Russian).
2. SP 88.13330.2014. The protective shelters of civil defense. Updated edition of SNiP II-11–77\*. Moscow, 2014. 152 p. (In Russian)
3. Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R., Gandziy M.V. Numerical and Experimental Research of Yielding Supports in Dynamic Loading. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20 (4): 103–110. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-103-110 (In Russian)

4. Galyautdinov Z.R. "Strength and deformability of reinforced concrete beam and slab structures on yielding supports under dynamic loading". DSc Abstract. Tomsk, 2021. 48 p. (In Russian)
5. Elfetori F.A. Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 2013; 7 (2): 183–186.
6. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V. Experimental Analysis and Modeling of Two-Way Reinforced Concrete Slabs over Different Kinds of Yielding Supports under Short-Term Dynamic Loading. *Engineering Structures*. 2015; (96): 88–99.
7. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes. In: *Proc. 12th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction. Procedia Engineering*. 2011; (14): 442–449.
8. Kellas S., Corliss J. Design, Fabrication and Testing of a Crushable Energy Absorber for a Passive Earth Entry Vehicle. *Engineering, Environmental Science*, 2002.
9. Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2009; 4 (3): 95–104.
10. Lipa S., Kotelko M. Lateral Impact of Tubular Structure – Theoretical and Experimental Analysis. Part 1 – Investigation of Single Tube. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2013; 51 (4): 873–882.
11. Somya P., Chawalit T., and Umphisak T. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes. Subjected to Bending World Academy of Science. *Engineering and Technology*. 2007; 36: 329–334.
12. Younes M.M. Finite Element Modeling of Crushing Behaviour of Thin Tubes with Various Cross-Sections. In: *Proc. 13th Int. Conf. 'Aerospace Science, Aviation Technology'*, May 26–28. 2009.
13. Galyautdinov Z.R., Kumpyak O.G. Strength Analysis of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports under Dynamic Loading. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2022; (5): 33–41. (In Russian).
14. Galyautdinov Z.R., Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R., Shipilova E.V. Dynamic Calculation of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports beyond Limits of Elasticity. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2019; (4): 63–70. (In Russian)
15. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength and Deformability of Reinforced Concrete Structures on Yielding Supports under Dynamic Loading. Tomsk: TSUAB, 2016. 270 p. (In Russian)
16. Odnokopylov G.I., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov Z.R. Determination of Survivability Parameters of Protected Critical Building Structures under Shock-Wave Loading. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2019; 330 (4): 110–125. (In Russian)
17. Rastorguev B.S. Ensuring Survivability of Buildings under Special Dynamic Effects. *Bezopasnost' sooruzhenii*. 2003; (4): 45–48. (In Russian)
18. Rastorguev B.S. "Strength of reinforced concrete building structures in explosive industries and special structures subject to dynamic load". DSc Abstract. 1987. 37 p. (In Russian)
19. Said A.-R.A. "Increasing the bearing capacity of reinforced concrete structures under explosive effects". DSc Thesis. 1995. 207 p. (In Russian)
20. Vinogradova T.N. "Thrust effect on reinforced concrete beam under dynamic load". PhD Thesis, 1977. 155 p. (In Russian)
21. Galyautdinov D.R. "Strength and deformability of reinforced concrete beam with thrust on yielding supports under dynamic loading". PhD Abstract 2023. 24 p. (In Russian)
22. Galyautdinov D.R. "Strength and deformability of reinforced concrete beam with thrust on yielding supports under dynamic loading". PhD Abstract, 2023. 24 p. (In Russian)
23. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Krylov S.M. New about Steel Concrete Strength. Moscow: Stroyizdat, 1976. 272 p. (In Russian)
24. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Thrust Effect on Strength of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports under Dynamic Loading. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2023; (1): 5–16. (In Russian)
25. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Experimental Research of Reinforced Concrete Edge Supported Slabs with Spacers. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (3): 113–120. (In Russian)

26. Popov N.N., Rastorguev B.S. Calculation of Reinforced Concrete Structures for the Action of Short-Term Dynamic Loads. Moscow: Stroyizdat, 1964. 151 p. (In Russian)
27. Kumpyak O.G., Galyautdinov B.R. Numerical Calculation of Reinforced Concrete Beams with Spacing on Compliant Supports under Dynamic Load. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (5): 81–97. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97 (In Russian)

#### Сведения об авторах

Кумпяк Олег Григорьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, OGKumpyak@yandex.ru

Галютдинов Заур Рашидович, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, GazR@yandex.ru

Галютдинов Дауд Рашидович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, DaudG@yandex.ru

#### Authors Details

Oleg G. Kumpyak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, OGKumpyak@yandex.ru

Zaur R. Galyautdinov, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, GazR@yandex.ru

Daud R. Galyautdinov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, DaudG@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 24.06.2025  
Одобрена после рецензирования 17.07.2025  
Принята к публикации 03.09.2025

Submitted for publication 24.06.2025  
Approved after review 17.07.2025  
Accepted for publication 03.09.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 160–173.

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 (5): 160–173.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-160-173

EDN: QKAQJM

# К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

**Мохаммад Махди Каширипур, Владимир Александрович Николук**  
*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе анализируется интеграция искусственного интеллекта с современными технологиями. На основе изученных мировых научных источников рассматриваются методы и возможности такого внедрения. Демонстрируется результат интеграции и возможности последующего развития. Предоставляется подробное описание недостатков и преимуществ применения инновационных технологий с интегрированным искусственным интеллектом в строительной индустрии. Исследование направлено на анализ возможностей и перспектив интеграции технологий искусственного интеллекта в строительную отрасль для научного и общественного ознакомления.

**Актуальность.** Несмотря на обилие новых технологий, ключевой задачей остается отбор тех из них, которые уже доказали свою практическую пользу. Поэтому систематический анализ успешных кейсов внедрения таких технологий в современных реалиях является крайне востребованным для определения обоснованных векторов дальнейшей технологизации строительства.

**Цель исследования:** изучить востребованные на данный момент технологии в мировой строительной практике с влиянием на них искусственного интеллекта, подробно рассмотреть эффективность их использования с точки зрения экономики, сохранения экологии и природных ресурсов, обеспечения безопасного ведения трудовой деятельности, возможности последующего развития с выявлением как недостатков, так и преимуществ.

**Материалы и методы.** Анализ научной литературы, научно-исследовательских трудов, интернет-источников, частных каналов и мнений активных энтузиастов, интересующихся и работающих над процессом разработки и внедрения инновационных технологий.

**Результаты и выводы.** Разработана методология внедрения современных технологий в строительство и проанализированы их преимущества с ограничениями. Определены ключевые понятия, сущность и мировая востребованность данных решений, а также обоснована необходимость их практического применения.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, строительная индустрия, инновационные технологии, строительство, жизнедеятельность, конструкции

**Для цитирования:** Каширипур М.М., Николук В.А. К вопросу использования искусственного интеллекта в строительной индустрии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 160–173. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-160-173. EDN: QKAQJM

## ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS ARTIFICIAL INTELLIGENCE  
IN CONSTRUCTION INDUSTRY

Mohammad M. Kashiripoor, Vladimir A. Nikolyuk  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Abstract.** This paper analyzes the integration of artificial intelligence with current technologies. Possibilities and methods of integration with modern innovations are revealed in the paper according to the studied and analyzed information from scientific sources around the world. The result of integration and possibilities of further development are demonstrated. A detailed description is provided for disadvantages and advantages of applying innovative technologies with integrated artificial intelligence in the construction industry. This paper familiarizes both the scientific community and the civilian population with opportunities and development prospects of construction industry through the introduction of artificial intelligence technology.

**Relevance:** the study of current and effective technologies that have proven themselves with a positive side in the construction industry. Analysis of their implementation and use in modern realities.

**Purpose:** The aim of the paper is to study the currently demanded technologies in the world construction utilizing artificial intelligence, consider in detail the efficiency of its use in economy, preservation of ecology and natural resources, ensuring safe labor activity, the possibility of further modernization and development with the provision of both disadvantages and advantages.

**Methodology:** A study of scientific literature, research papers, Internet sources, private channels and opinions of active enthusiasts interested in and working on the implementation and development of innovative technologies.

**Research findings:** The introduction and use of modern technologies in the construction industry is outlined, advantages and disadvantages of innovations are described. Basic concepts of modern technologies, their essence and demand in the world are studied, the necessity of their application and exploitation is described.

**Keywords:** artificial intelligence, construction industry, innovative technologies, construction, life, structures.

**For citation:** Kashiripoor M.M., Nikolyuk V.A. Towards Artificial Intelligence in Construction Industry. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 160–173. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-160-173. EDN: QKAQJM

## Введение

Благодаря прогрессу инновационных технологий строительная индустрия стремительными темпами переходит на новый этап развития, внедряя искусственный интеллект. Улучшая качество выполняемых задач с соблюдением поставленных сроков, повышая экономическую составляющую строительной отрасли и соблюдая требования техники безопасности, технология искусственного интеллекта продвинулась в своем развитии на годы вперед. Активное внедрение инновационных технологий в строительный бизнес демонстрирует положительную динамику в вопросах решения сложных и энергоемких задач.

Цель исследования заключается в изучении эффективности интеграции искусственного интеллекта в строительную индустрию и определении влияния применения рассматриваемой технологии на жизнедеятельность человека в целом.

Задачи, способствующие достижению цели:

- изучение имеющихся в открытом доступе результатов применения искусственного интеллекта;
- рассмотрение актуальных инноваций в строительной индустрии;
- анализ трудов научного сообщества по рассматриваемой теме;
- оценивание эффективности интеграции искусственного интеллекта с актуальными технологиями;
- анализ отклика населения на использование инновационных технологий.

Методами проведения исследования являются изучение и сбор информации из научно-исследовательских источников, анализ примеров применения технологий в реальной практике, изложение личного мнения и составление вывода.

### Результаты и обсуждение

Ежедневное развитие технологий предоставляет возможность интегрировать нововведения почти в любую сферу жизнедеятельности человека. Строительная индустрия не остается без внимания инновационных технологий, предлагая расширенные возможности их применения почти на каждой стадии ведения строительного бизнеса. Внедрение инновационных технологий в строительную индустрию позволяет исключить риски травматизма рабочих при выполнении поставленных задач, уменьшить количество трудозатрат на выполнение работ, повысить экономические показатели как крупных предприятий, так и малого бизнеса, неся за собой эффективный прирост прибыли в государственную казну, позволяя улучшить качество жизни населения [1]. Кроме того, инновационные технологии способны поддерживать сохранность окружающей среды, минимизируя вредные выбросы и экономя природные ресурсы. Далее будут рассмотрены наиболее востребованные и имеющие положительную динамику эксплуатации инновации [2].

*BIM (Building Information Modeling)* – технология, использование которой позволяет объединить работу нескольких специалистов разных направленностей в одно целое, создавая при этом 3D-модель объекта, наполненную исходной информацией. Работа с рассматриваемой технологией происходит с помощью использования данных, сохраненных на одном сервере. Доступ к серверу открыт всем участникам проекта.

*3D-печать* – технология, использование которой предоставляет возможность печатать как конструкции, детали, элементы, необходимые для проведения строительных работ, так и малые сооружения, такие как мосты, коттеджи. Применение данной технологии востребовано среди малого бизнеса, предоставляющего услуги по изготовлению материалов и возведению усадебных комплексов [3].

*Переработанные и экологически чистые материалы* – технология переработки отходов жизнедеятельности человека в материалы, использование которых актуально как в строительной сфере, так и во многих других отраслях, имеет лидирующие показатели востребованности среди населения за счет возможности сохранения окружающей среды и природных ресурсов.

*Энергосберегающие методы* – актуальность данного метода заключается в освоении переработки и эффективном применении как солнечной, так и вет-



ровой энергии, позволяя при этом уменьшить количество выбросов в окружающую среду.

*Роботизация* – технология, использование которой позволяет уменьшить риск получения людьми травм на своем рабочем месте за счет эксплуатации роботов, запрограммированных на выполнение поставленных задач.

*Датчики* – использование данной технологии позволяет удаленно и оперативно отслеживать состояние различных конструкций, эксплуатация которых играет важную роль в жизни человека.

*Лазерное сканирование* – технология, позволяющая в кратчайшие сроки создать 3D-модель объекта с помощью полученных точек, имеющих точность в 0,5–5 мм, посредством проведения предварительного сканирования [4]. Эффективное применение данной технологии можно выделить в местах объекта, доступ к которым затруднен или же находится в опасной для человеческой жизни зоне.

*Big Data* – большой поток информации и данных, обработка и структуризация которых доступна только на промышленных компьютерах, поскольку бытовые персональные компьютеры не способны уместить и обработать такой объем данных. Эффективное применение данной технологии позволяет добиться высоких результатов во многих сферах жизнедеятельности за счет предоставления проанализированной информации.

На данный момент при изучении научной литературы и трудов экспертов выделяется своей эффективностью технология искусственного интеллекта [5]. Поскольку данная инновация находится на стадии зарождения, научное сообщество только начинает углубляться в ее изучение, предоставляя в открытом доступе свои результаты применения и эксплуатации искусственного интеллекта как в лабораторных, так и в реальных условиях. Данная технология уже имеет положительную динамику развития, предоставляя эффективные результаты своего применения. Сегодня наибольшую потребность в использовании искусственного интеллекта имеют такие страны и государства, как США, Россия, Польша, Германия [6].

### **Искусственный интеллект (Artificial intelligence, ИИ, AI)**

Прогресс не стоит на месте, ученые и энтузиасты по всему миру выдвигают свои инновации во благо жизнедеятельности человека, добиваясь высоких оценок со стороны населения и организаций, использующих научные разработки. Человечество стремится создать технологию, которая объединит и заменит существующие решения, усовершенствовав ключевые сферы жизни. Именно искусственный интеллект при должном развитии может стать такой универсальной основой.

Повседневное использование даже базовых возможностей ИИ стимулирует его изучение и ускоряет прогресс в этой области [7, 8].

За счет продолжительного и упорного развития современных технологий, способных произвести положительное влияние на строительную индустрию и жизнедеятельность человека в целом, появляется возможность интеграции искусственного интеллекта в технологии, получившие колоссальное признание со стороны мировых экспертов в сфере развития технологий, а также

специалистов, применивших данные инновации в рабочем процессе. Для наиболее удачной интеграции искусственного интеллекта с современными технологиями следует досконально изучить каждую из инноваций, учесть экономическую часть данного вопроса, предусмотреть возможные непредвиденные затраты, убедиться в высоких показателях человеческой безопасности, а также актуальности использования с возможностью последующего развития.

На данный момент наиболее эффективными и зарекомендовавшими себя на мировой арене инновациями выделяют:

1. BIM.
2. 3D-печать.
3. Лазерное сканирование.
4. Робототехника.
5. Big Data.

При детальном рассмотрении данных инноваций не возникает ни малейшего сомнения в актуальности и эффективности их использования как с экономической точки зрения, так и с точки зрения безопасности жизнедеятельности рабочих. Кроме того, данные инновации отлично поддаются параллельной интеграции с технологией искусственного интеллекта, позволяя открыть новые возможности в сфере строительства, сформировать новый рынок труда, увеличить экономические показатели, повысить работоспособность и улучшить качество жизни человека. Таким образом, следует досконально изучить и описать варианты возможной интеграции искусственного интеллекта с вышеуказанными технологиями.

**BIM.** Интеграция искусственного интеллекта с технологией BIM (Building Information Modeling) подразумевает как расширение возможностей применения данной технологии, так и увеличение ее коэффициента полезного действия при производстве работ. Рассматривая технологию BIM с интегрированным в нее ИИ на примере первоначального создания информационной модели, возможно посредством проведения анализа климатического района будущей застройки заранее определить эффективность использования тех или иных материалов для возведения здания, его отделки и утепления, установить остаточный срок службы, а также рассчитать финансовые затраты, предлагая вариации как дизайна, так и конструктивного решения [9].

Осуществление анализа климатического района происходит посредством предоставления климатических данных на интересующем нас земельном участке за последние несколько лет искусственному интеллекту, который, в свою очередь, проводит анализ, рассчитывает возможное изменение климата, предусматривает возникновение катаклизмов и неблагоприятных условий. Следующий шаг после проведения анализа – предоставление результатов проведенной работы. За счет проведенного анализа выдвигаются варианты использования материалов для проведения строительных работ, которые, по мнению искусственного интеллекта, обеспечат наибольший срок службы возводимого здания на данном участке климатического района. Кроме того, будет выявлена расчетная стоимость закупки данных материалов внутри рассматриваемого государства, а также будут даны рекомендации по производству строительных работ в зависимости от времени года.

Таким образом, строительные компании могут сэкономить время на проведение организационных работ, параллельно ускоряя последующие процессы. Для потенциальных заказчиков данный метод интеграции искусственного интеллекта позволяет заранее определить экономическую выгоду проведения строительных работ и выявить возможные риски возведения и эксплуатации будущего объекта. При согласовании проведенных аналитических работ на первоначальных этапах следует разработать и моделирование информационной модели здания [10, 11]. Включая в себя исходные данные, полученные на первоначальном этапе посредством анализа климатического района, модель наполняется сведениями, позволяющими производить искусственному интеллекту анализ отклонений от проекта и тем самым рассчитывать риски. В будущем, при передаче заказчику информационной модели, работы над которой велись с использованием ИИ, появится возможность продолжить эксплуатацию данной технологии без дополнительного обучения. Необходимо будет только добавлять исходные данные и информацию, связанную с принятием новых норм и правил в строительной сфере.

**3D-печать.** На данный момент 3D-печать занимает одну из лидирующих строчек среди используемых технологий по всему миру. Она приобрела популярность как среди строительных гигантов, так и среди малых коммерческих фирм благодаря своим положительным качествам: она предлагает и заказчику, и исполнителю экономически выгодные условия возведения и последующей эксплуатации объектов, созданных на основе 3D-печати. За счет интеграции искусственного интеллекта в технологию 3D-печати появляется возможность избежать как системных, так и связанных с человеческим фактором ошибок в реализации строительных работ.

Искусственный интеллект способен взять на себя ответственность за выбор оптимального материала и исключить возможные ошибки оператора, провести постобработку печати, тем самым исключая ее недочеты и экономя время и материалы на ручную доработку объекта. ИИ также способен определить оптимальную высоту и плотность слоя печати, траекторию. Основопологающим действием в разработке объекта посредством 3D-принтера является создание его модели [3]. Нередко она берется из каталога или разрабатывается специалистами долгое время, однако всегда остается риск наличия ошибок, допущенных при построении, которые определяются после производства печатных работ. Данные ошибки часто связаны с человеческим фактором, упущением каких-то аспектов при построении, но также могут быть системно допущенными.

Искусственный интеллект, в свою очередь, способен сгенерировать и проработать модель объекта, тем самым исключая вероятность возникновения ошибок специалистов, связанных с человеческим фактором, и системных ошибок, связанных с неисправностью программного обеспечения. Возможность интеграции ИИ позволяет разнообразить и расширить библиотеку моделей, увеличивая тем самым финансовый поток, исходящий от заказчиков, уменьшить вероятность допущения ошибок, экономя время и деньги как заказчика, так и исполнителя.

Данный метод за счет своей дешевизны способен на государственном уровне выступить экологичным и экономически выгодным решением по массовому возведению жилищных объектов, позволяя сократить число бездомных

граждан, увеличить экономические показатели государства, а также выступить инновационным решением по вопросу жилищных проблем после катаклизмов [12]. В январе 2025 г. в штате Калифорния произошли катастрофические разрушения жилищных объектов из-за массовых пожаров. Стоимость реконструкции городской черты оценивается в миллиарды долларов, сроки проведения строительных работ – в несколько десятилетий, что несет за собой рост цен на оказываемые строительные услуги и количества людей без постоянного места жительства. Данный метод интеграции искусственного интеллекта с технологией 3D-печати способен выступить своеобразной подушкой безопасности для штата Калифорния: он ускорит процесс возведения жилищных объектов, заменив привычный в США метод постройки с использованием легковоспламеняющегося деревянного каркаса, уменьшив рост количества нуждающихся в жилищных объектах [13].

**Лазерное сканирование.** Лазерное сканирование имеет большую востребованность среди специалистов различных сфер жизнедеятельности человека. В строительной индустрии данная технология является неотъемлемой частью проведения предпроектных работ благодаря своему функционалу и возможностям. К ним относятся: точность сканирования объектов с частотой вплоть до 0,5–5 мм, возможность эксплуатации и проведения работ в любое время суток, не привязываясь к световому дню, полная интеграция с информационной моделью объекта (с дополнением ее необходимыми значениями), возможность удаленного проведения работ (достаточно актуально в ситуациях, когда необходимый объект находится в труднодоступном участке или же в опасной для человека зоне) [14].

Также следует выделить тот факт, что лазерное сканирование имеет минимальные затраты по времени проведения работ, что способствует ускорению всех последующих процессов и экономит трудозатраты рабочих. Интеграция искусственного интеллекта с данной технологией может обеспечить более эффективный результат проведения работ по сканированию за счет автоматической доработки модели, создаваемой по результатам проведенного сканирования. Поскольку работы с помощью лазерного сканирования могут проходить в любое время суток, в финальном результате часто могут возникать коллизии модели (в темное время суток может получаться некорректное сканирование), обработкой и доработкой которых занимаются специалисты, затрачивая на это большое количество времени. Искусственный интеллект способен заранее определять возникновение коллизий за счет нехватки или недостоверности поступающих на сервер данных, информируя при этом инженера, управляющего ходом проведения сканирования, который, в свою очередь, предпримет меры по повторному проведению работ на участке с выявленными недочетами. Помимо оповещения специалистов об обнаружении коллизий при сканировании, технология искусственного интеллекта способна провести редакционные работы модели, распознавая такие участки и правя их за счет анализа проблемного места. Анализ основан на изучении проблемного участка со всех сторон, распознавании верхних и нижних точек, ширины и высоты, глубины и выпуклости данной части модели [15].

Данный анализ позволяет увеличить и доработать точность отсканированной модели, что влечет за собой уменьшение времени на повторное скани-

рование и ручную доработку модели. Описываемая технология также используется при сканировании памятников архитектуры, достопримечательных мест и объектов старой и ветхой застройки, чертежная документация на которые чаще всего утеряна или же находится в непригодном состоянии, при этом подступы к таким объектам имеют высокую травмоопасность для рабочих [16]. Лазерное сканирование позволяет восстановить эти данные посредством своего функционала, обеспечивая удаленное проведение работ, минимизируя риски получения травм, экономя количество задействованных специалистов, предоставляя минимальные затраты как по времени, так и по финансированию.

**Робототехника.** Робототехника имеет отличные показатели эффективности внедрения во все сферы деятельности человека. Строительная отрасль также не осталась без внимания данной технологии, заменяя элементарный человеческий труд менее прихотливыми и более экономически выгодными электронными единицами – роботами. Эксплуатируя и внедряя повсеместно данную технологию, человечество стало задумываться о полной замене человеческой рабочей силы на обученных роботов, что позволит уберечь свои предприятия от ошибок, связанных с человеческим фактором. Кроме того, производство работ, связанных с использованием данной технологии, не требует наличия ежедневного отдыха и ежемесячной оплаты труда.

Заменив живую рабочую силу, предприятия и различные организации по всему миру увеличили свои экономические показатели в несколько раз, позволив производству работать 24 ч в сутки [17]. Помимо полученных показателей роста прибыли и уменьшения ежемесячных затрат, организациям также важно иметь качественное производство, что достаточно трудно отследить, не имея уровня интеллекта для распознавания брака. Достаточно допустить малейший машинный сбой роботизированного производства, чтобы получить брак продукции и понести производственные убытки впоследствии.

Решением данной проблемы может выступить интеграция искусственного интеллекта с робототехникой. Поскольку робототехника связана с действиями, четко заложенными программой, появляются проблемы, решение которых возможно за счет отклонения от работы, прописанной программным обеспечением, решения возникшей проблемы и последующего возвращения к выполнению поставленной задачи. Искусственный интеллект, интегрированный в робота, способен исключить проблемы в процессе работы посредством проведения анализа ситуации на производстве. При распознавании брака или нетипичности производимого изделия искусственный интеллект проводит анализ системы всего производства, находя катализатор проблемы. ИИ разбирается с ним самостоятельно либо при невозможности самостоятельного устранения подает сигнал о возникновении проблемы специалисту. Данная интеграция способствует уменьшению количества финансовых потерь производства из-за выпуска бракованной продукции, еще большему уменьшению задействованного рабочего персонала, поддержанию и повышению качества выпускаемой продукции, увеличению прироста прибыли.

**Big Data.** Технология Big Data в агрессивной манере завоевывает все возможные направления жизнедеятельности человека, строительная индустрия также не осталась без внимания. Применение данной технологии в строительстве

расширило спектр возможностей специалистов посредством своего функционала для анализа большого объема данных. Специалистам удалось принять участие в разработках и выполнении тех работ, рациональность и выгода которых повсеместно ставились под сомнение [18]. Экспериментируя с реализацией смелых проектов, воплощение которых произошло благодаря сложному, но в то же время быстрому анализу, крупные компании повысили свои экономические показатели, обеспечили рабочими местами большое количество специалистов, предоставили миру инновационный взгляд на принятие сложных решений [19].

Интеграция искусственного интеллекта с технологией Big Data позволит анализировать большое количество информации и предлагать обоснованные решения, связанные с рисками для компаний. Кроме того, эта мера даст возможность увеличить скорость обработки еще большего потока информации и данных, что влечет за собой скачок финансового прироста для предприятий, уменьшение роста возникающих в последующем рисков, обеспечение безопасности [11]. Существуют разные виды рисков, влияние которых отражается на принятии решения в отношении того или иного проекта. Восприятие рисков человеческим разумом способно затенить корректную пошаговость принятия решений, что влечет за собой допущение ошибочных действий. Поскольку технология Big Data больше направлена на четко прописанный системный анализ, возникновение отрицательно действующих на поэтапность хода работ факторов сводится к нулю, что позволяет исключить допущение ошибочных решений [16]. Искусственный интеллект, в свою очередь, способен имитировать человеческий подход к решению этой задачи, но при этом анализировать значительно больший объем данных.

### Преимущества и недостатки

Изучив каждую из наиболее востребованных на данный момент инноваций, способных продемонстрировать высокие показатели эффективности как в строительной сфере, так и в повседневной жизни человека, за счет интеграции с технологией искусственного интеллекта, следует выделить их преимущества и недостатки, с учетом которых можно оценить влияние рассматриваемых технологий на последующее их развитие и мировую гонку инноваций.

#### *Преимущества:*

- уменьшение финансовых затрат на реализацию проектов;
- достижение высоких результатов в сохранении и улучшении качества труда рабочих;
- сокращение задействованных работников в реализации проектов;
- уменьшение возникновения рисков на всех этапах проведения работ;
- удаленный контроль проведения работ;
- высокая скорость выполнения рабочих мероприятий;
- подход к решению рабочих вопросов с имитацией человеческого подхода;
- предоставление возможности последующего развития технологий;
- экологически безопасная деятельность с сокращением использования и выброса вредных материалов.

#### *Недостатки:*

- уменьшение количества рабочих, что порождает рост безработицы;



- недостаток инженеров по внедрению и эксплуатации;
- дефицит финансирования за счет недостаточного принятия обществом;
- начальная стадия развития технологии с непроработанными проблемами в системе;
- необходимость регулярного анализа выполненных действий и внесения корректировок для выявления ошибок.

### Выводы

Рассмотрев и проанализировав возможности искусственного интеллекта в интеграции с различными инновационными технологиями, занимающими лидирующее положение по востребованности и эффективности выполнения поставленных задач, следует сделать вывод, что искусственный интеллект находится на ранней стадии развития, имея при этом недостатки в разработке, связанные с нехваткой квалифицированных кадров, способных наладить рабочий процесс данной технологии. В то же время, несмотря на изученные изъяны системы, ИИ демонстрирует высокие показатели исполнительности и качества имеющегося труда. Развитие и изучение данной технологии способны привести к реализации полностью нового и всеми востребованного механизма ведения бизнеса. Повышая экономическую составляющую и развивая технику безопасного ведения рабочего процесса как для человека, так и для окружающей среды, искусственный интеллект остается в центре внимания специалистов и ученых, что позволяет на ранних этапах осуществлять частное развитие данной направленности, не требуя крупных вложений. Количество имеющихся на данный момент преимуществ уже способно перекрыть количество недостатков данной технологии, что знаменует возможность искоренения отрицательных факторов благодаря углубленному изучению и доработкам проблематики искусственного интеллекта. Таким образом, благодаря проведенному исследованию влияния искусственного интеллекта на строительную индустрию появляется возможность сделать следующие выводы:

- влияние, оказываемое искусственным интеллектом на строительную индустрию, подводит человечество к прогрессу в замене привычного мышления для решения конкретных задач на искусственно созданный разум, не уступающий ни по каким параметрам человеческому;
- количество заинтересованных в изучении и внедрении искусственного интеллекта людей растет с большой скоростью, способствуя развитию человеческого мышления;
- инновации, применяемые на данный момент, способны демонстрировать еще больший по качеству выполнения работ результат благодаря интеграции с искусственным интеллектом;
- повышение количества финансовых вложений в развитие инновационных технологий способно улучшить и повысить качество жизнедеятельности человека;
- технология искусственного интеллекта не имеет границ в развитии, предоставляя человечеству возможность бесконечной модернизации и развития себя как важнейшего инструмента жизнедеятельности.

### Заключение

Настоящая исследовательская работа способна предоставить ученым и частным энтузиастам базу знаний и возможностей технологии искусственного интеллекта для последующего его изучения и развития. Внедрение и эксплуатация искусственного интеллекта в повседневной и профессиональной жизнедеятельности человека имеет большую востребованность, предоставляя возможность как малому, так и крупному бизнесу разрабатывать и применять продукцию, не имеющую аналогов на рынке, способствуя повышению качества жизни населения, увеличивая экономические показатели стран, экономя затраты задействованной энергии и восполняя экологические запасы посредством уменьшения выброса в атмосферу вредных веществ.

Имеющиеся в общем доступе показатели эксплуатации и внедрения искусственного интеллекта во все сферы жизнедеятельности человека демонстрируют положительные результаты, имеющие большой потенциал для улучшения.

Помимо положительного опыта использования технологии искусственного интеллекта, следует учитывать необходимость его контроля. Учеными до сих пор не до конца изучено восприятие рассматриваемой технологией определенных потоков информации, данных, знаний, что в последующем может отрицательно повлиять на человечество в целом.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каширинур М.М., Николюк В.А. Возможности искусственного интеллекта в строительной индустрии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 26 (1). С. 163–178. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178. EDN: KRQYWZ
2. Искусственный интеллект в строительстве // Айбим : [сайт]. URL: <https://bim-info.ru/articles/iskusstvennyy-intellekt-v-stroitelstve/?ysclid=m6iy8lgea3788520490> (дата обращения: 10.01.2025).
3. Каширинур М.М., Гарагозов С.Б. Новые тенденции и инновации в строительстве: строительство с помощью 3D-принтера // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой научно-технической конференции в рамках 20-й Международной научно-технической конференции БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой научно-технической конференции БНТУ, 4–5 мая 2022 г. Минск : БНТУ, 2022. С. 94–99. EDN: LSVARP
4. Инновации в строительной отрасли // PERI : [сайт]. URL: <https://academy.peri.ru/blog/innovacii-v-stroitelnoj-otrasli-v-2023-godu?ysclid=m5zt1sohmt212267675> (дата обращения: 10.01.2025).
5. Kyivska K., Tsiutsiura S. Implementation of artificial intelligence in the construction industry and analysis of existing technologies // Technology audit and production reserves. 2021. № 2. P. 12–15. DOI:10.15587/2706-5448.2021.229532
6. Adeloje A., Diekola O., Delvin K., Gbenga C. Applications of Artificial Intelligence (AI) in the construction industry: A review of Observational Studies // Applied Sciences Research Periodicals. 2023. V. 1. № 4. P. 42–52. DOI: 10.13140/RG.2.2.15025.97124
7. Каширинур М.М., Борејко В.М. Автоматический мониторинг для сложных сооружений и инфраструктуры города // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Международной научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2022. С. 90–94.
8. Искусственный интеллект и аддитивные технологии: перспективы взаимодействия. Блог 3D-экспертов // IQB : [сайт]. URL: <https://blog.iqb.ru/ai-3d-printing-intersection/?ysclid=m6ixhtensc502604765> (дата обращения: 08.01.2025).
9. Каширинур М.М., Альмалеги А.М. Разработка подходящей методологии управления строительными проектами // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспек-

- тивы развития : сборник материалов студенческой научно-технической конференции в рамках 20-й Международной научно-технической конференции БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой научно-технической конференции БНТУ, 4–5 мая 2022 г. Минск : БНТУ, 2022. С. 78–83.
10. *Каширипур М.М.* Технологии четвертой волны в строительстве и архитектуре: от идеи до реализации (часть 2) // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14. № 3. С. 178–193. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.22
  11. *Каширипур М.М.* Технологии четвертой волны в строительстве и архитектуре: от идеи до реализации (часть 3): примеры применения технологий четвертой волны в строительстве и архитектуре // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14. № 4. С. 171–179. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.24
  12. *Каширипур М.М.* Город метавселенной: определение и направление развития для градостроительства и архитектуры // Вестник Брестского государственного технического университета (Вестник БрГТУ). 2023. № 3 (132). С. 2–10. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-2-10
  13. *Каширипур М.М., Кухарева И.В.* Инновации в строительстве: строительство домов из отходов // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой научно-технической конференции в рамках 20-й Международной научно-технической конференции БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой научно-технической конференции БНТУ, 4–5 мая 2022 г. Минск : БНТУ, 2022. С. 100–103.
  14. *Как с помощью лазерного 3D-сканирования сократить риски при строительстве и реконструкции зданий и объектов* // Цифровое Строительство : [сайт]. URL: <https://digital-build.ru/kak-s-pomoshhyu-lazernogo-3d-skanirovaniya-sokratit-riski-pri-stroitelstve-i-rekonstrukcii/?ysclid=m6iy1xrd6h211821245> (дата обращения: 07.01.2025).
  15. *Каширипур М.М., Аль-Сайяб А.А.* Надлежащая методология автоматизированного мониторинга в процессе строительства // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой научно-технической конференции в рамках 20-й Международной научно-технической конференции БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой научно-технической конференции БНТУ, 4–5 мая 2022 г. Минск : БНТУ, 2022. С. 84–88.
  16. *Eber V.* Potentials of artificial intelligence in construction management // Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal. 2020. I. 1. P. 2053–2063.
  17. *Каширипур М.М., Борейко В.М.* Автоматический мониторинг для сложных сооружений и инфраструктуры города // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Международной научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2022. С. 90–94.
  18. *Использование ИИ в строительстве: примеры и будущее* // Gectaro : [сайт]. URL: <https://gectaro.com/blog/tpost/r71jb8y1x1-ispolzovanie-ii-v-stroitelstve-primeri-i?ysclid=m6i7mulcwq9216836> (дата обращения: 08.01.2025).
  19. *Artificial Intelligence for Big Data & How They Work Together* // Trending New. URL: <https://stargazerowl.com/artificial-intelligence-for-big-data-how-they-work-together/> (дата обращения: 03.01.2025).

## REFERENCES

1. *Kashiripoor M.M.* Artificial Intelligence as a New Trend in Construction Industry. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (1): 163–178. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178 (In Russian)
2. Artificial intelligence in construction. Available: <https://bim-info.ru/articles/iskusstvennyy-intellekt-v-stroitelstve/?ysclid=m6iy8lgea3788520490> (accessed January 10, 2025). (In Russian)
3. *Kashiripur M.M., Garagozov S.B.* New Trends and Innovations in Construction: Building with a 3D Printer. In: *Proc. 20th Int. Sci. Conf. 'Science to Education Production and Economics'* and *Proc. 78th Sci. Conf. of Students*. O.S. Golubova Ed., May 4–5, Minsk. 2022. Pp. 94–99. EDN: LSVARP (In Russian)
4. Innovations in the construction industry. Available: <https://academy.peri.ru/blog/innovacii-v-stroitelnoj-otrasli-v-2023-godu?ysclid=m5zt1sohmt212267675> (accessed January 10, 2025). (In Russian)

5. Kyivska K., Tsiutsiura S. Implementation of Artificial Intelligence in the Construction Industry and Analysis of Existing Technologies. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021; (2): 12–15. Available: [www.researchgate.net/publication/351792203\\_Implementation\\_of\\_artificial\\_intelligence\\_in\\_the\\_construction\\_industry\\_and\\_analysis\\_of\\_existing\\_technologies](http://www.researchgate.net/publication/351792203_Implementation_of_artificial_intelligence_in_the_construction_industry_and_analysis_of_existing_technologies)
6. Adeloye A., et al. Applications of Artificial Intelligence (AI) in the Construction Industry: A Review of Observational Studies. *Trends in Applied Sciences Research*. 2023; 1 (4): 42–52. DOI: 10.13140/RG.2.2.15025.97124
7. Kashiripour M.M., Boreiko V.M. Automatic Monitoring for Complex Structures and City Infrastructure. In: *Proc. 3rd Int. Sci. Conf. 'Road Construction and its Engineering Support'*. Minsk, 2022. Pp. 90–94. (In Russian)
8. Artificial intelligence and additive technologies: prospects of interaction. Blog of 3D-experts. Available: <https://blog.iqb.ru/ai-3d-printing-intersection/?ysclid=m6ixhtensc502604765> (accessed January 8, 2025). (In Russian)
9. Kashiripour M.M., Almalegi A.M. Development of Suitable Construction Project Management Methodology. In: *Proc. 20th Int. Sci. Conf. 'Science to Education Production and Economics' and Proc. 78th Sci. Conf. of Students*. O.S. Golubova Ed., May 4–5, Minsk. 2022. Pp. 78–83. (In Russian)
10. Kashiripour M.M. Fourth Wave Technologies in Construction and Architecture: From Idea to Implementation (Part 2). *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2024; 14 (3): 178–193. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.22. (In Russian)
11. Kashiripour M.M. Fourth Wave Technologies in Construction and Architecture: From Idea to Implementation (Part 3: Applications of the Fourth Wave Technology in constRuction and Architecture). *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2024; 14 (3): 171–179. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.24 (In Russian)
12. Kashiripour M.M. Metaverse City: Definition and Direction Development for Urban Planning and Architecture. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022; 3 (129): 2–10. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-2-10 (In Russian)
13. Kashiripour M.M., Kukhareva I.V. Innovations in Construction: Building Houses from Waste Materials. In: *Proc. 20th Int. Sci. Conf. 'Science to Education Production and Economics' and Proc. 78th Sci. Conf. of Students*. O.S. Golubova Ed., May 4–5, Minsk. 2022. Pp. 100–103 (In Russian)
14. How to reduce risks in construction and reconstruction of buildings and objects with the help of 3D laser scanning. Available: <https://digital-build.ru/kak-s-pomoshhyu-lazernogo-3d-skanirovaniya-sokratit-riski-pri-stroitelstve-i-rekonstrukcii/?ysclid=m6iy1xrd6h211821245> (accessed January 7, 2025). (In Russian)
15. Kashiripour M.M., Al-Sayyab A.A. Proper Automated Monitoring Methodology in Progress of Construction. In: *Proc. 20th Int. Sci. Conf. 'Science to Education Production and Economics' and Proc. 78th Sci. Conf. of Students*. O.S. Golubova Ed., May 4–5, Minsk. 2022. Pp. 84–88. (In Russian)
16. Eber W. Potentials of Artificial Intelligence in Construction Management. *Organizaciya, tekhnologiya i upravlenie v stroitel'stve: mezhdunarodnyj zhurnal*. 2020; 12: 2053–2063. (In Russian)
17. Kashiripour M.M., Boreyko V.M. Automatic Monitoring for Complex Structures and Infrastructure of the City. In: *Proc. 3rd Int. Sci. Conf.* Minsk, 2022. Pp. 90–94. (In Russian)
18. Use of AI in construction: examples and future. Available: <https://gectaro.com/blog/tpost/r71jb8yxx1-ispolzovanie-ii-v-stroitelstve-primeri-i?ysclid=m6i7mulcwq9216836> (accessed January 8, 2025).
19. Artificial intelligence for big data & how they work together. Available: <https://medium.com/@jonraihan/artificial-intelligence-for-big-data-how-they-work-together-6e489f28a831> (accessed January 3, 2025).

#### Сведения об авторах

Каширипур Мохаммад Махди, канд. архитектуры, доцент, Белорусский национальный технический университет, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 150, mkashiripour@gmail.com

*Николюк Владимир Александрович*, магистрант, Белорусский национальный технический университет, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 150, vladimir.nik2001@yandex.by

**Authors Details**

*Mohammad M. Kashiripoor*, PhD, A/Professor, Belarusian National Technical University, 65, Prospekt Nezavisimosti, Minsk, Belarus, mkashiripoor@gmail.com

*Vladimir A. Nikolyuk*, Graduate Student, Belarusian National Technical University, 65, Prospekt Nezavisimosti, Minsk, Belarus, vladimir.nik2001@yandex.by

**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 26.03.2025  
Одобрена после рецензирования 16.04.2025  
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 26.03.2025  
Approved after review 16.04.2025  
Accepted for publication 27.05.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 174–184.

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 (5): 174–184.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-174-184

EDN: QTVHRS

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАМПЛИНА ЛЕТАЮЩИХ ЛЫЖНИКОВ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ

**Иван Иванович Подшивалов**

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

**Аннотация.** Объектом исследования являются металлические конструкции трамплина летающих лыжников в условиях реконструкции с заданным уровнем нагружения и с анализом статической схемы работы трамплина до и после усиления нижних поясов ферм напрягаемыми стальными тросами.

**Цель** работы состоит в расчетном обосновании необходимого уровня усиления металлических ферм при реконструкции трамплина, чтобы обеспечить нормативную прочность/устойчивость и жесткость трамплина летающих лыжников.

Поверочный расчет выполнен с учетом фактической конструктивной схемы трамплина летающих лыжников и его реальными прочностными характеристиками стали с разработкой пространственной расчетной конечно-элементной модели в программном комплексе Ing+2021 MicroFe.

**Результаты.** Для трамплина как системы повышенной деформативности расчетным путем обоснован способ повышения его недостаточной жесткости с помощью усиления нижних поясов ферм с применением напрягаемых стальных тросов с конкретным усилием их натяжения. Выполнен анализ изменившегося напряженно-деформированного состояния усиленных металлических конструкций и проведен конструктивный расчет элементов трамплина летающих лыжников с целью оценки прочности/устойчивости и жесткости металлических конструкций в условиях реконструкции.

**Ключевые слова:** трамплин, металлические фермы, поверочный расчет, расчетная модель, жесткость, усиление, конструктивный расчет

**Для цитирования:** Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлических конструкций трамплина летающих лыжников в условиях реконструкции // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 174–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-174-184. EDN: QTVHRS



ORIGINAL ARTICLE

# FINITE ELEMENT MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF SKI-JUMP METAL STRUCTURES UNDER RECONSTRUCTION

Ivan I. Podshivalov

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

**Abstract.** *Purpose:* The aim of this work is to calculate the required level of reinforcement of ski-jump metal structures under reconstruction in order to provide its referenced strength/stability and rigidity.

*Methodology/approach:* The stress-strain state of the ski-jump structure and its real strength properties is performed by the finite element method using the verified software package Ing+2021 MicroFe.

*Research findings:* The ski-jump rigidity is improved by reinforcement of bottom chords using tensile steel flexible cables with the certain tension force. The strength analyses are given to a changed stress-strain state of strengthened structures and ski-jump elements.

**Keywords:** ski-jump, metal structure; check analysis; computational model; rigidity, reinforcement, strength analysis

**For citation:** Podshivalov I.I. Finite Element Modeling of Stress-Strain State of Ski-Jump Metal Structures under Reconstruction. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 174–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-174-184. EDN: QTVHRS

В настоящее время металлические сооружения, возведенные в период 1950–1980 гг., как правило, требуют реконструкции по различным причинам, в том числе в связи с изменением условий работы сооружения и действующих на него нагрузок по сравнению с теми нагрузками, на которые оно было запроектировано [1]. При выполнении пространственных расчетов необходимо учитывать требования действующих нормативных документов, которые во многом стали жестче, чем те, по которым сооружение проектировалось [2, 3]. Частично удовлетворить эти требования позволяет методика расчета из статьи Д.С. Боровского [4]. Данная методика оценивает прочность стержневых элементов (открытого профиля) стальных конструкций, усиленных под нагрузкой, в условиях многопараметрического нагружения. При усилении стальных конструкций, находящихся под эксплуатационной нагрузкой, следует также учитывать начальные напряжения, деформативность элементов под нагрузкой и др. [5]

Исследования устойчивости решетчатых стержней [6, 7] позволили обобщить метод их расчета, когда влияние сдвиговых деформаций учитывается увеличением расчетной длины стержня, по которой определяется его приведенная гибкость. В статье Г.И. Белого [8] в аналитической форме оценено влияние дефектов, повреждений, а также расцентровки узлов решетчатых элементов на общую устойчивость сквозного стержня. В этой работе также учитывается обеспечение устойчивости ветвей между узлами решетки.

Исследование напряженно-деформированного состояния узлов рам в упруго-пластической стадии работы податливых узлов стальных каркасов многоэтаж-

ных зданий выполнено на основе методов расчета с использованием вычислительного комплекса ABAQUS [9]. В работе А.Р. Туснина [10] представлены результаты экспериментальных исследований плоских ферм при повреждении отдельных их стержней. По полученным данным было определено перераспределение усилий на соседние элементы фермы.

Моделирование действительной работы решетчатых опор башенного типа в вычислительном комплексе SCAD выполнено в разработанной пространственной модели опоры высоковольтной линии электропередачи [11], где проведено сравнение полученных внутренних усилий с аналогичными усилиями в элементах типовой анкерно-угловой опоры.

На основе анализа существующего опыта создания конструктивной формы башенных сооружений А.В. Голиков и И.Р. Ситников [12] предложили конструктивное решение для башни, состоящей из центрального ствола с параллельно расположенными по внешней окружности предварительно напряженными затяжками. Указаны направления совершенствования конструктивной формы башен предложенного конструктивного решения.

Обобщенные исследования, выполненные Е.И. Беленей [13], показали, что предварительное напряжение позволяет повысить несущую способность металлических конструкций, их жесткость, общую устойчивость. В то же время, начиная с 1990-х гг., в России наблюдается снижение теоретических и экспериментальных исследований, а также практики внедрения стальных предварительно напряженных конструкций [14].

Распространение получили тросовые системы, которые имеют как преимущество, позволяющее перекрывать значительные пролеты, так и недостаток – повышенную деформативность под внешним воздействием. В связи с этим расчет тросовых систем по второй группе предельных состояний становится определяющим [15]. При этом большое значение имеет не только эффективное использование высокопрочных тросов, но и оптимальное конструктивное решение для элементов тросовой системы [16].

В настоящей статье объектом исследования является трамплин летающих лыжников (далее трамплин), который был введен в эксплуатацию в 1958 г. (рис. 1). Трамплин состоит из двух конструктивно независимых сооружений – собственно трамплина и лифтовой шахты. Трамплин включает в себя дорожку разгона, переходную кривую и прыжковый стол. Размеры трамплина по габаритным осям: длина – 73,9 м; ширина – 4,5 м; высота – 42,8 м (рис. 2). В качестве опор используются три столбчатых железобетонных фундамента на естественном основании.

Дорожка разгона имеет следующие габаритные размеры: длина – 72,76 м, ширина – 4,5 м, высота – 4,37 м. Несущими конструкциями дорожки разгона являются две вертикальные металлические фермы с параллельными поясами из спаренных уголков –  $2\angle 200\times 16$ . Стойки ферм –  $2\angle 150\times 12$ ; раскосы –  $2\angle 80\times 8$ ,  $2\angle 125\times 10$ . Фермы между собой раскреплены связями.

Несущими конструкциями переходной кривой и прыжкового стола являются также две вертикальные металлические фермы переменной высоты от 6,75 до 1,3 м, длина – 22,0 м, ширина – 4,5 м. В каждой металлической ферме имеются следующие конструктивные элементы: верхний пояс –  $2\angle 100\times 10$ ;

нижний пояс –  $2\angle 75\times 9$ ; стойки –  $2\angle 200\times 16$  (над промежуточной опорой трамплина),  $2\angle 100\times 16$ ,  $2\angle 90\times 8$ ,  $2\angle 75\times 9$ ; раскосы –  $2\angle 100\times 10$ ,  $2\angle 75\times 9$ . Фермы также раскреплены между собой связями.



Рис. 1. Общий вид трамплина и лифтовой шахты  
Fig. 1. General view of the ski-jump and lift shaft

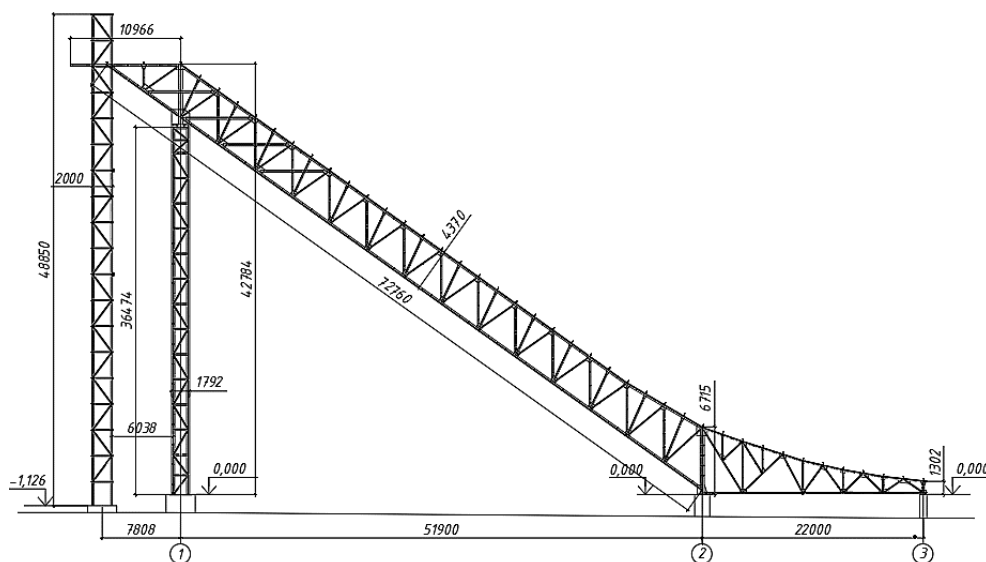


Рис. 2. Геометрическая схема трамплина и лифтовой шахты  
Fig. 2. Geometry of the ski-jump and lift shaft

Вертикальная опора дорожки разгона высотой 36,474 м – пространственная решетчатая конструкция переменного сечения по высоте, в состав которой входят следующие конструктивные элементы: четыре стойки –  $2 \angle 150 \times 12$ ; горизонтальные продольные распорки на 16 уровнях – тавр Т150; горизонтальные поперечные распорки на 8 уровнях –  $2 \angle 90 \times 9$ . Вертикальные поперечные связи: горизонтальные распорки –  $2 \angle 100 \times 10$ ; раскосы –  $2 \angle 100 \times 10$ . Горизонтальные крестовые связи –  $2 \angle 100 \times 10$ .

Поверочный расчет выполнен с помощью программного комплекса Ing+2021 MicroFe. В разработанной расчетной модели (рис. 3) столбчатые фундаменты трамплина моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», металлические элементы моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунтовое слоистое основание моделировалось объемными конечными элементами.

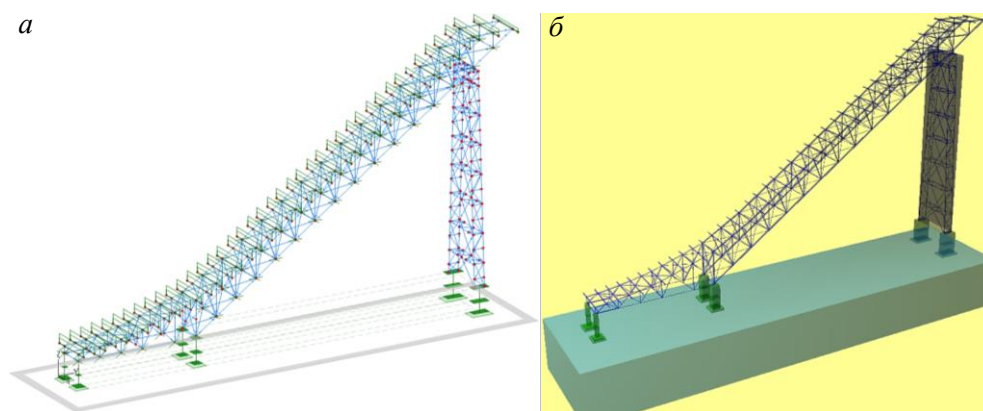


Рис. 3. Разработанная модель:

*а* – расчетная конечно-элементная модель; *б* – визуализация расчетной конечно-элементной модели

Fig. 3. Computational FEM (a) and visualization (b)

В расчетной модели при заданном уровне нагружения трамплина в условиях реконструкции были рассмотрены две расчетные схемы:

- расчетная схема № 1 – фактическое конструктивное решение трамплина по результатам обследования;
- расчетная схема № 2 – конструктивное решение трамплина в условиях реконструкции с учетом изменения статической схемы работы трамплина путем усиления нижних поясов ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами [17, 18].

*Расчетная схема № 1.* Изополя продольных сил в элементах трамплина приведены на рис. 4, где видно, что наибольшие сжимающие и наибольшие растягивающие продольные силы возникают в верхнем и нижнем поясах ферм дорожки разгона и соответственно равны  $N_{с.вп\ max} = -1861,5$  кН и  $N_{р.ни\ max} = 1839,2$  кН. В элементах решетки – стойки, раскосы – продольные силы знакопеременны и находятся в интервале от  $N_{с.реш\ max} = -751,3$  кН до  $N_{р.реш\ max} = 358,9$  кН.

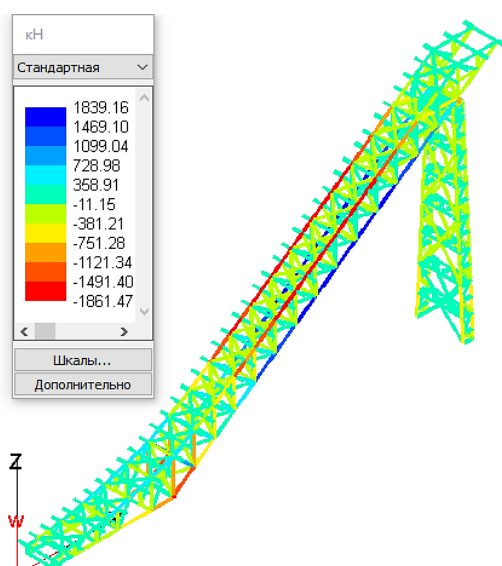


Рис. 4. Изополя продольных сил в металлических элементах трамплина в расчетной схеме № 1  
Fig. 4. Isofields of longitudinal forces in metal elements of ski-jump in calculation diagram 1

Изополя вертикальных перемещений трамплина представлены на рис. 5, откуда следует, что максимальные прогибы возникли в пролетной части дорожки разгона и составляют  $f_{\max} = 277,3$  мм, которое превышает предельно допустимое значение  $f_{\text{иверт}} = L_s/300 = 63\,730 / 300 = 212,4$  мм, где  $L_s = 63\,730$  мм – длина пролета дорожки разгона. Таким образом, условие по второй группе предельных состояний для пролетного строения дорожки разгона не выполняется, и необходимо повысить его жесткость.

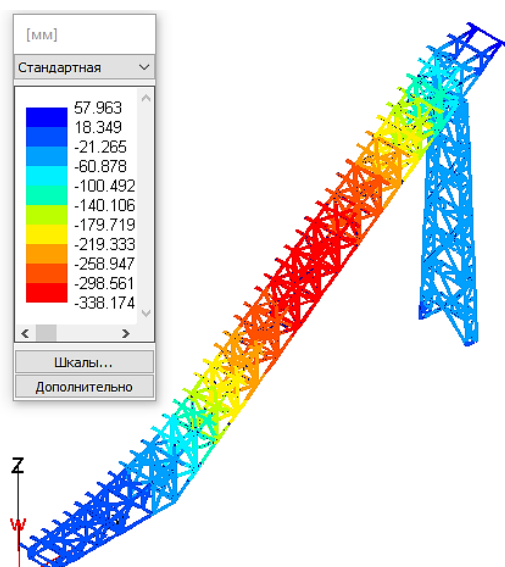


Рис. 5. Изополя вертикальных перемещений металлических конструкций в расчетной схеме № 1  
Fig. 5. Isofields of vertical displacements in metal elements of ski-jump in calculation diagram 1

*Расчетная схема № 2.* Повышение жесткости пролетного строения дорожки разгона осуществляется с помощью стальных напрягаемых тросов, расположенных в нижних поясах ферм. Напряжение тросов выполняется с помощью натяжных устройств, расположенных в опорных узлах ферм. Величина силы натяжения на каждый нижний пояс двух ферм составляет  $P_{\text{нат.нп}} = 1500$  кН.

Изополя продольных сил в элементах трамплина приведены на рис. 6, из которого следует, что напряженное состояние в элементах ферм трамплина существенно изменилось по сравнению с расчетной схемой № 1. Так, в верхних поясах ферм дорожки разгона наибольшие сжимающие продольные силы увеличились на 15 % и составили  $N_{\text{с.вп.нат max}} = -2183,5$  кН, а в нижних поясах ферм дорожки разгона максимальные растягивающие продольные силы, наоборот, уменьшились на 59 % и стали равны  $N_{\text{р.нп.нат max}} = 754,8$  кН.

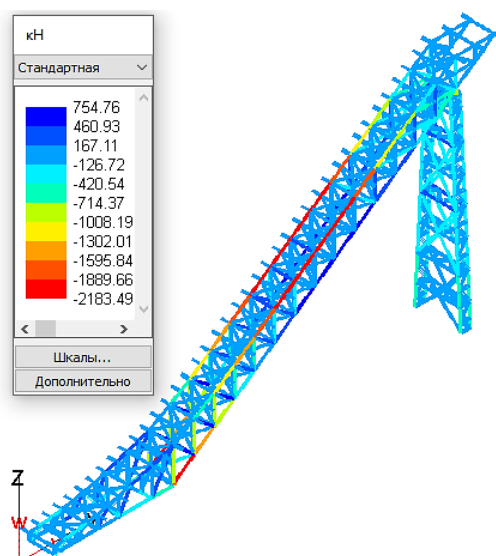


Рис. 6. Изополя продольных сил в металлических элементах трамплина в расчетной схеме № 2  
Fig. 6. Isofields of longitudinal forces in metal elements of ski-jump in calculation diagram 2

В элементах решетки продольные силы, так же как и в предыдущем случае, знакопеременны и находятся в интервале от  $N_{\text{с.реш max}} = -1302,0$  кН до  $N_{\text{р.реш max}} = 167,1$  кН. При этом наибольшие сжимающие продольные силы в элементах решетки увеличились на 42 %, а максимальные растягивающие силы в элементах решетки, наоборот, уменьшились на 53 %.

Изополя вертикальных перемещений трамплина представлены на рис. 7, где показано, что максимальное значение прогибов установлено в пролетной части дорожки разгона и составляет  $f_{\text{max}} = 179,9$  мм, которое не превышает предельно допустимое значение  $f_{\text{верт}} = 212,4$  мм. Таким образом, за счет обжатия нижних поясов ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами изменилась статическая схема работы металлических конструкций трамплина и условие по второй группе предельных состояний стало выполняться, необходимая жесткость трамплина при его реконструкции будет обеспечена.



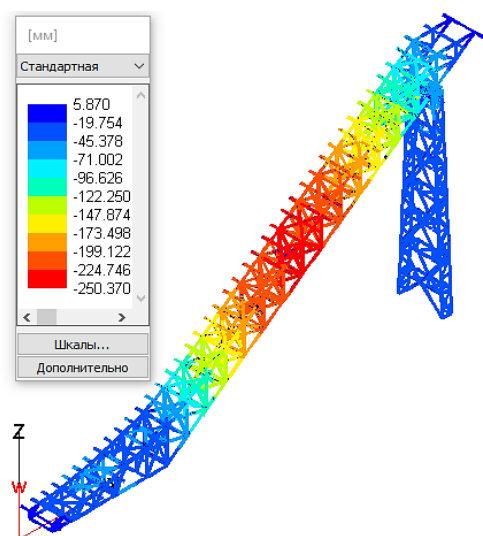


Рис. 7. Изополя вертикальных перемещений металлических конструкций в расчетной схеме № 2  
Fig. 7. Isofields of vertical displacements in metal elements of ski-jump in calculation diagram 2

Итоговые результаты конструктивного расчета металлических конструкций трамплина в условиях реконструкции представлены на рис. 8. Наибольшее значение коэффициента использования сечения конструктивных элементов трамплина составляет  $K_{ly} = 0,97 < 1$ . Следовательно, прочность/устойчивость металлических элементов трамплина после проведения его реконструкции будет обеспечена.

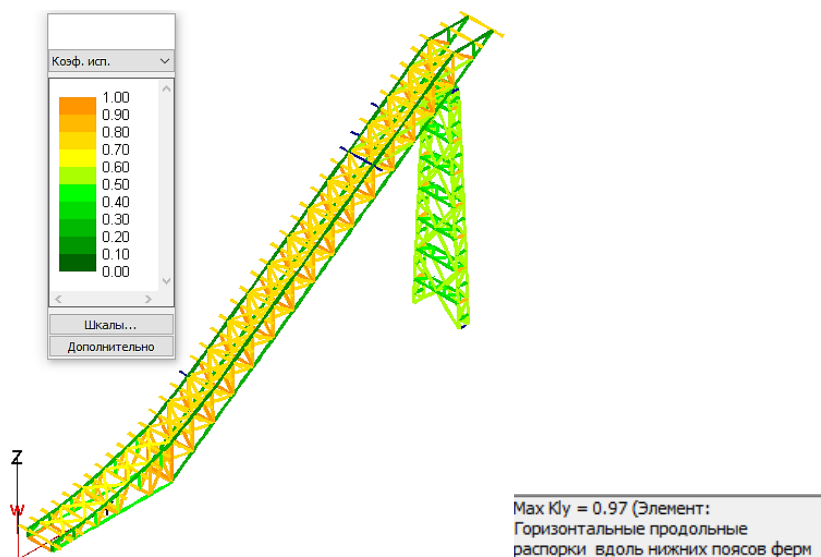


Рис. 8. Изополя коэффициентов использования сечения конструктивных элементов трамплина в расчетной схеме № 2  
Fig. 8. Isofields of use factor of structural element cross-sections of ski-jump in calculation diagram 2

В заключение необходимо отметить, что за длительный период эксплуатации трамплина (с 1958 г.) изменились нормативные климатические нагрузки по сравнению с климатическими, на которые трамплин был запроектирован. В связи с этим в условиях реконструкции возникла необходимость в оценке технического состояния трамплина, в том числе и в определении напряженно-деформированного состояния его металлических конструкций.

Из поверочного расчета было установлено, что вследствие повышенной деформативности трамплина условие по второй группе предельных состояний не выполняется. Для обеспечения нормативной жесткости трамплина было предложено выполнить усиление металлических ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами в нижних поясах ферм, что привело к существенному изменению напряженно-деформированного состояния металлических элементов трамплина.

Выполненный конструктивный расчет элементов трамплина с учетом усиления нижних поясов ферм дорожки разгона напрягаемыми стальными тросами показал, что прочность/устойчивость металлических конструкций трамплина обеспечена. Таким образом, после проведения усиления металлических конструкций трамплина на заданный уровень нагружения при его реконструкции условия по первой и по второй группам предельных состояний для трамплина выполняются.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Туснина О.А. Расчетное сопровождение реконструкции каркасов действующих металлургических цехов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 241–253. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.241-253. EDN: PUYOWX
2. Золина Т.В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108. EDN: SZCFRC
3. Золина Т.В., Туснин А.Р. Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49. EDN: TYCWVV
4. Боровский Д.С. Расчет на прочность усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2. С. 36–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-36-41
5. Михаськин В.В., Астахов И.В. К усилению изгибаемых элементов стальных конструкций, находящихся под нагрузкой // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2. С. 30–36. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-30-37
6. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. Москва : Наука, 1971. 807 с.
7. Стрелецкий Н.С. Материалы к курсу стальных конструкций. Москва : Госстройиздат, 1959. 283 с.
8. Белый Г.И., Лобовский М.О. Устойчивость ветвей решетчатых элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2. С. 18–29. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-18-29. EDN: YWGOEA
9. Туснина В.М., Коляго А.А. К вопросу действительной работы податливых узлов стальных каркасов многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 2. С. 28–34. EDN: YTCEAU
10. Туснин А.Р., Бергер М.П. Расчет металлической фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41. EDN: YOGUHB
11. Гаранжа И.М., Танасогло А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния анкерно-угловой воздушной линии электропередачи 110 кВ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 74–85. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-74-85. EDN: XWCDBB

12. Голиков А.В., Ситников И.Р. Напряженно-деформированное состояние башен с решетчатыми поясами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С 43–50.
13. Беленя Н.Е. Предварительно напряженные металлические конструкции. Москва : Стройиздат, 1963. 324 с.
14. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Развитие исследований предварительно напряженных строительных металлических конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6. С. 86–92. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-86-92. EDN: IWTGOI
15. Чесноков А.В., Михайлов В.В., Сабитов Л.С. Двухпоясная предварительно напряженная тросовая система с конструктивным зазором // Известия КазГАСУ. 2010. № 2. С. 137–142.
16. Гарифуллин М.Р., Семенов С.А., Беляева С.В., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2. С. 107–124. EDN: RWGNQF
17. Беленя Е.И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции. Москва : Стройиздат, 1963. 324 с.
18. Москалев М.Б., Горюнов М.В. К вопросу о регулировании НДС конструкций с учетом прогрессирующего обрушения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6. С.70–76. EDN: ECFSSC

#### REFERENCES

1. Tusnina O.A. Calculation of Framework Reconstruction in Operating Metallurgical Workshops. *Vestnik MGSU*. 2023; 18 (2): 241–253. (In Russian)
2. Zolina T.V. Examination Procedure for Building Residual Service Life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. (In Russian)
3. Zolina T.V., Tusnin A.R. Extending of Operation Life of Industrial Building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. (In Russian)
4. Borovskiy D.S. Strength Analysis of Rod Elements of Steel Structures under Multiparameter Loading. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 36–41. (In Russian)
5. Mikhaskin, V.V., Astakhov, I.V. Reinforcement of Bending Elements of Steel Structures under Load. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2023; 97 (2): 30–36. (In Russian)
6. Timoshenko S.P. Stability of Rods, Plates and Shells. Moscow: Nauka, 1971. 807 p. (In Russian)
7. Streletskii N.S. Course on Steel Structures. Vol. 1: Work of Compressed Vertical Rods. Moscow: Gosstroyizdat, 1959. 284 p. (In Russian)
8. Belyi G.I., Lobovskii M.O. Stability of Lattice Branch Elements of Steel Structures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2023; 97 (2): 18–29. (In Russian)
9. Tusnina V.M., Kolyago A.A. Toward Actual Work of Pliable Nodes of Steel Frames of Multi-story Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (2): 28–34. (In Russian)
10. Tusnin A.R., Berger M.P. Strength Analysis of Metal Truss with Damaged Elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (11): 35–41. (In Russian)
11. Garanzha I.M., Tanasoglo A.V. Stress-Strain State Analysis of Angle-Tension, Two-Circuit 110 kV Suspension Tower. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20(4): 74–85. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-74-85. EDN: XWCDBB (In Russian)
12. Golikov A.V., Sitnikov I.R. Stress-strain State of Towers with Lattice Belts. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (7), 43–50. (In Russian)
13. Belenya N.E. Prestressed Metal Structures. Moscow: Stroyizdat, 1963. 324 p. (In Russian)
14. Kravchuk V.A., Kravchuk E.V. Development of Research on Prestressed Building Metal Structures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 77 (6): 86–92. (In Russian)
15. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V., Sabitov L.S. Two-Belt Prestressed Cable System with a Structural Gap. *Izvestiya KazGASU*. 2010; 2 (14): 137–142. (In Russian)
16. Garifullin M.R., Semyonov S.A., Belyaeva S.V., Poryvaev I.A., Safiullin M.N., Semyonov A.A. Search for Rational Geometry of Spatial Metal Structure of Large-Span Sports Facility Cover. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2014; 2 (17): 107–124. (In Russian)
17. Belenya E.I. Prestressed Metal Bearing Structures. Moscow: Stroyizdat, 1963. 324 p. (In Russian)

18. *Moskalev M.B., Goryunov M.V.* Toward Regulation of VAT of Structures with Respect to Progressive Collapse. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020; 6 (83): 70–76. (In Russian)

**Сведения об авторе**

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

**Author Details**

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

Статья поступила в редакцию 03.12.2024  
Одобрена после рецензирования 19.12.2024  
Принята к публикации 05.05.2025

Submitted for publication 03.12.2024  
Approved after review 19.12.2024  
Accepted for publication 05.05.2025

# ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

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

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 185–199.

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 (5): 185–199.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.002.4:697.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-185-199

EDN: QVBCGZ

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УСЛОВИИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

**Алексей Николаевич Белоус<sup>1</sup>, Мира Викторовна Оверченко<sup>2</sup>,  
Ясмин Эдинович Бегич<sup>3</sup>, Ольга Евгениевна Белоус<sup>4</sup>,  
Артем Искандарович Еникеев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ООО «ГДЦ-Развитие», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
г. Макеевка, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Донской государственный технический университет,  
г. Ростов-на-Дону, Россия

**Аннотация.** Применение в ограждающих конструкциях строительных материалов, обладающих высокими теплозащитными свойствами, приобретает все большую важность в условиях существующих в мире энергетических и экологических проблем.

**Актуальность.** Поддержание оптимальных параметров температуры в помещении возможно при условии правильно подобранной теплоизоляции, которая обеспечивает и требуемые значения сопротивления теплопередаче, и показатели тепловой инерции ограждающих конструкций. Это, в свою очередь, способствует снижению потребления энергии зданиями, сокращает расходы на энергоресурсы и позволяет защитить окружающую среду от дополнительных вредных выбросов.

**Цель.** Установление фактических значений теплотехнических характеристик и их сопоставление с нормативными данными для оценки реальной эффективности теплоизоляционных материалов в строительных конструкциях.

**Методы.** В рамках работы были определены характеристики материалов как в стационарном, так и в квазистационарном тепловых режимах с использованием лабораторных методов и теоретических исследований.

**Результаты.** Анализ результатов лабораторных испытаний фрагмента стеновой конструкции выявил существенную разницу между экспериментально определенным коэффициентом теплопроводности и его теоретически рассчитанным значением. Данное расхождение объясняется неточностью нормативных данных, используемых для перевода коэффициента теплопроводности материала из сухого состояния в расчетное, учитывающее эксплуатационную влажность. Для базальтовой ваты отклонение составило 44 %, а для экструзионного пенополистирола – 19 %. Проведенные теоретические исследования продемонстрировали высокую степень соответствия результатов, полученных с использованием плоской расчетной модели, результатам лабораторных испытаний для базальтовой ваты и экструзионного пенополистирола в условиях стационарного и квазистационарного тепловых режимов. Данное соответствие позволило успешно верифицировать разработанную теоретическую модель. Преимуществом теоретического подхода является возможность анализа не только простых плоских конструктивных систем, но и более сложных ограждающих конструкций, содержащих геометрические теплопроводные включения.

Анализ динамики теплового потока в модели наружного угла здания выявил преимущества использования экструзионного пенополистирола в качестве теплоизоляции. В условиях квазистационарного теплового режима конструкция с экструзионным пенополистиролом демонстрирует более стабильные температурные показатели в своей толще по сравнению с аналогичной конструкцией, утепленной базальтовой ватой. Это приводит к уменьшению количества циклов перехода температуры через нулевое значение для материалов, расположенных внутри ограждающей конструкции, что положительно влияет на их долговечность и надежность.

**Ключевые слова:** теплотехнические характеристики, экструзионный пенополистирол, минеральная вата, квазистационарный тепловой режим, лабораторные испытания

**Для цитирования:** Белоус А.Н., Оверченко М.В., Бегич Я.Э., Белоус О.Е., Еникеев А.И. Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов при условии квазистационарного теплового режима // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 185–199. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-185-199. EDN: QVBCGZ

## ORIGINAL ARTICLE

### THERMAL PROPERTIES OF HEAT INSULATING MATERIALS UNDER QUASI-STATIONARY THERMAL CONDITIONS

Aleksei N. Belous<sup>1</sup>, Mira V. Overchenko<sup>2</sup>, Yasmin E. Begich<sup>3</sup>,  
Ol'ga E. Belous<sup>4</sup>, Artem I. Enikeev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО "GDTs-Razvitie", Moscow Russia

<sup>2</sup>Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Russia

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St-Petersburg, Russia

<sup>4</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

**Abstract.** Maintenance of the best parameters of the indoor temperature is possible with properly selected heat insulation that provides both the required heat transfer resistance and thermal



inertia indicators of building envelopes. This, in turn, reduces the energy consumption of buildings, energy costs and helps to protect the environment from additional harmful emissions.

**Purpose:** The aim of the work is to obtain actual thermal properties and compare them with the standard data in order to evaluate the real effectiveness of heat insulating materials for buildings.

**Research findings:** The properties of materials are determined in both steady-state and quasi-steady-state thermal conditions using laboratory methods and theoretical studies. The analysis of the laboratory tests of the wall fragment shows a significant difference between the experimentally determined thermal conductivity coefficient and its theoretically calculated value. This difference is explained by inaccurate normative data used to convert the thermal conductivity coefficient from a dry state to the calculated value that accounts for the operational humidity. For basalt wool, the deviation is 44%, and for extruded polystyrene foam, it is 19 %. Theoretical calculations demonstrate good agreement with the experimental data obtained using the 2D calculation model and laboratory test results for basalt wool and extruded polystyrene foam under steady-state and quasi-steady-state thermal conditions. This agreement allows to successfully verify the developed theoretical model. The advantage of the theoretical approach is the ability to analyze not only 2D structures, but also more complex enclosing structures containing heat-conducting inclusions.

**Value:** The analysis of the heat flow dynamics in the model of the outer building corner shows the advantages of using extruded polystyrene foam as thermal insulation. Under quasi-steady-state thermal conditions, the structure with extruded polystyrene foam demonstrates more stable temperature indicators throughout its thickness compared to the similar structure insulated with basalt wool. This leads to a reduction in the number of temperature transition cycles through zero for materials inside the building envelope, which has a positive effect on their durability and reliability.

**Keywords:** thermal properties, extruded polystyrene foam, mineral wool, quasi-stationary thermal conditions, laboratory test

**For citation:** Belous A.N., Overchenko M.V., Begich Ya.E., Belous O.E., Enikeev A.I. Thermal Properties of Heat Insulating Materials under Quasi-Stationary Thermal Conditions. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 185–199. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-185-199. EDN: QVBCGZ

## Введение

В современных реалиях вследствие глобального потепления, энергетического кризиса и экологических проблем страны вынуждены уменьшать потребление энергии, значительная часть которой используется для отопления и кондиционирования помещений. Здания, предназначенные для жилья и общественных нужд, потребляют много энергии, и большая часть спроса на нее обусловлена потерей тепла через непрозрачные наружные ограждающие конструкции. Экономия энергии посредством теплоизоляции является важным условием для устойчивого проектирования и энергоэффективности. Теплоизоляция при эффективном ее применении замедляет теплообмен между внутренней и внешней средой здания.

Теплоизоляционные материалы обладают высокой тепловой инерцией, которая позволяет либо препятствовать прохождению теплового потока, либо корректировать колебания на внутренней поверхности ограждающих конструкций вследствие запаздывания температурных колебаний в толще конструкции. Особенно это важно для регионов с холодным или жарким климатом, где благодаря правильно подобранной теплоизоляции обеспечивается необходимое значение сопротивления теплопередаче конструкции  $R$  в сочетании

с тепловой инерцией  $D$ . В этом случае здания могут поддерживать желаемый уровень температуры в помещении, потребляя меньше энергии, что приносит пользу как окружающей среде, так и экономике. Поэтому при выборе материала важно определить оптимальное сочетание результативности изоляции и экономического эффекта от ее применения. Из-за таких факторов, как различные климатические условия региона, толщина конструктивного и изоляционного материала, используемого в зданиях при неодинаковых условиях, теплоизоляционные материалы должны быть изучены дополнительно. В ряде работ была исследована толщина теплоизоляции в зависимости от вида материала [1–8]; влияние изоляционных материалов и ориентации стен (север, юг, запад и восток) на оптимальную изоляцию с использованием солнечного излучения было изучено другими исследователями [9, 11, 12]. Анализ исследовательских работ показал, что наиболее часто используемыми изоляционными материалами являются минеральная и базальтовая вата, экструзионный пенополистирол (Extruded polystyrene foam, далее – XPS) для стен из штучных материалов.

В работе [10] предложена модель анизотропной изоляции, которая основана на различной интенсивности солнечного облучения в зависимости от ориентации. Модель изоляции использует неравномерную структуру коэффициента теплопередачи через ограждающую конструкцию здания и определяет толщину слоя изоляции в различных ориентациях с использованием принципа равной интенсивности теплового потока. Это приведет к тому, что температура внутренней поверхности оболочки будет одинаковой и значительно уменьшит разницу в тепловой среде комнат различной ориентации. В работе [12] исследования проводились для четырех вариантов конструкции стен с различными теплоизоляционными материалами. Исследованы теплотехнические характеристики всех материалов слоев конструкции, определены общие затраты на отопление, экономия затрат на электроэнергию и срок окупаемости в соответствии с оптимальной толщиной утеплителя с учетом различной конфигурации стен и изоляционных материалов. Установлено, что вместо применения одинаковой толщины изоляции во всех ориентациях можно использовать материалы с различной толщиной в зависимости от ориентации.

В исследованиях [13–16] рассмотрены различные варианты теплоизоляции зданий и методики расчетов теплотехнических параметров с учетом различных видов теплоизоляционных материалов и их влияния на теплотехнические свойства ограждающих конструкций.

Таким образом, для различных регионов разных стран выбор теплоизоляционного материала и его толщину необходимо принимать в зависимости от особенностей климата на основании действующей нормативной документации.

Цель работы – установление фактических значений теплотехнических характеристик и их сопоставление с нормативными данными для оценки реальной эффективности теплоизоляционных материалов в строительных конструкциях.

Задачи исследования:

1. Провести лабораторные исследования теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов на примере базальтовой ваты и экструзионного пенополистирола.

2. Выполнить теоретические исследования теплотехнических свойств теплоизоляционных материалов посредством численного моделирования.

3. Произвести сравнительный анализ результатов, полученных в ходе лабораторных и теоретических исследований теплоизоляционных материалов.

### Методы исследований

В работе представлены исследования теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов на примере базальтовой ваты и XPS. Выбор этих материалов обусловлен их широким применением в строительной практике на территории Российской Федерации. Одновременно были проведены лабораторные и теоретические исследования теплотехнических свойств XPS и базальтовой ваты.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой климатическую камеру, в которой находятся испытательные стенды (рис. 1). Испытательные стенды выполнены в форме кубов из экструзионного пенополистирола размером  $1035 \times 1035$  мм, толщиной стенки  $\sim 350$  мм. На одной из сторон куба помещается фрагмент исследуемой конструкции размером  $500 \times 500$  мм.



Рис. 1. Климатическая камера с испытательными стендами (общий вид)

Fig. 1. General view of environmental chamber with the test board

Исследуемые фрагменты конструкций состоят из внутреннего слоя, выполненного из газобетона толщиной 100 мм, плотностью  $582 \text{ кг/м}^3$  и коэффициентом теплопроводности при условии эксплуатации «Б»  $0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  (установленном на основании испытаний в аккредитованной лаборатории), слоя

теплоизоляции толщиной 50 мм и цементно-песчаной штукатурки толщиной 10 мм. Общий вид испытуемых образцов схематично представлен на рис. 2. В качестве теплоизоляционного слоя для одного образца принята базальтовая вата плотностью  $123 \text{ кг/м}^3$ , для второго – XPS плотностью  $21 \text{ кг/м}^3$ .

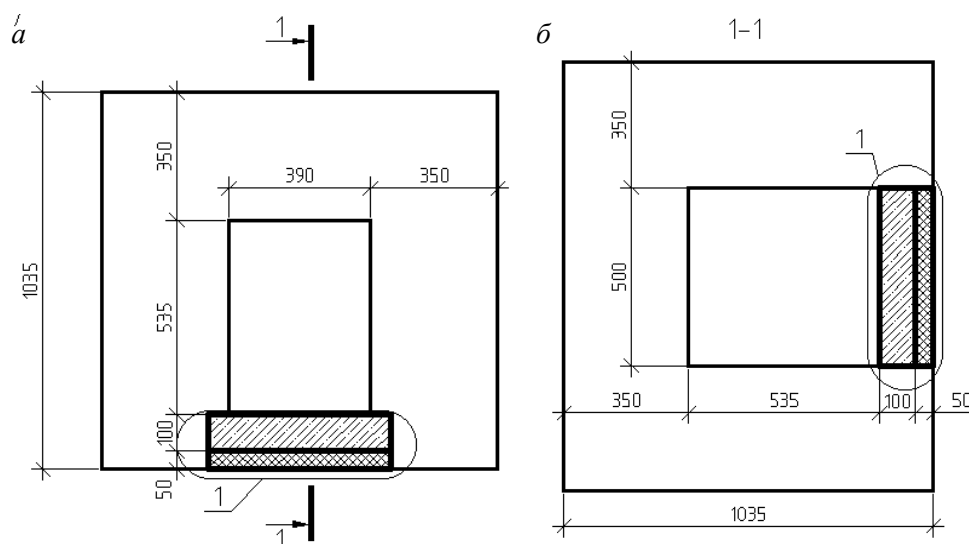


Рис. 2. Испытательный стенд:  
а – план; б – разрез; 1 – исследуемый фрагмент конструкции, установленный на испытательном стенде

Fig. 2. Test board:  
а – plan; б – cross section; 1 – wall fragment

Внутри климатической камеры имитируются температурно-влажностные условия наружной среды, наиболее неблагоприятные с точки зрения эксплуатационных воздействий. Внутри лабораторной установки, расположенной в климатической камере, поддерживается температура воздуха  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  и влажность в диапазоне 60–65 %. Климатические воздействия в камере моделируются путем попеременного охлаждения-нагрева, имитирующего нестационарный режим.

### Результаты лабораторных исследований

При лабораторных исследованиях образцов фрагмента стены был смоделирован квазистационарный тепловой режим ограждающей конструкции. При этом в связи с техническими особенностями климатической камеры период теплового режима был принят равным 48 ч, амплитуда колебания температуры на наружной поверхности принята  $18^\circ\text{C}$ . В результате лабораторных исследований было установлено, что для образца фрагмента конструкции с теплоизоляционным слоем из XPS амплитуда колебаний температуры в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетона составила  $A_{\text{XPS}} = 4,3^\circ\text{C}$ , а для образца с теплоизоляционным слоем из базальтовой ваты амплитуда колебаний равна  $A_{\text{мин.вата}} = 5,5^\circ\text{C}$  (графики на рис. 3).

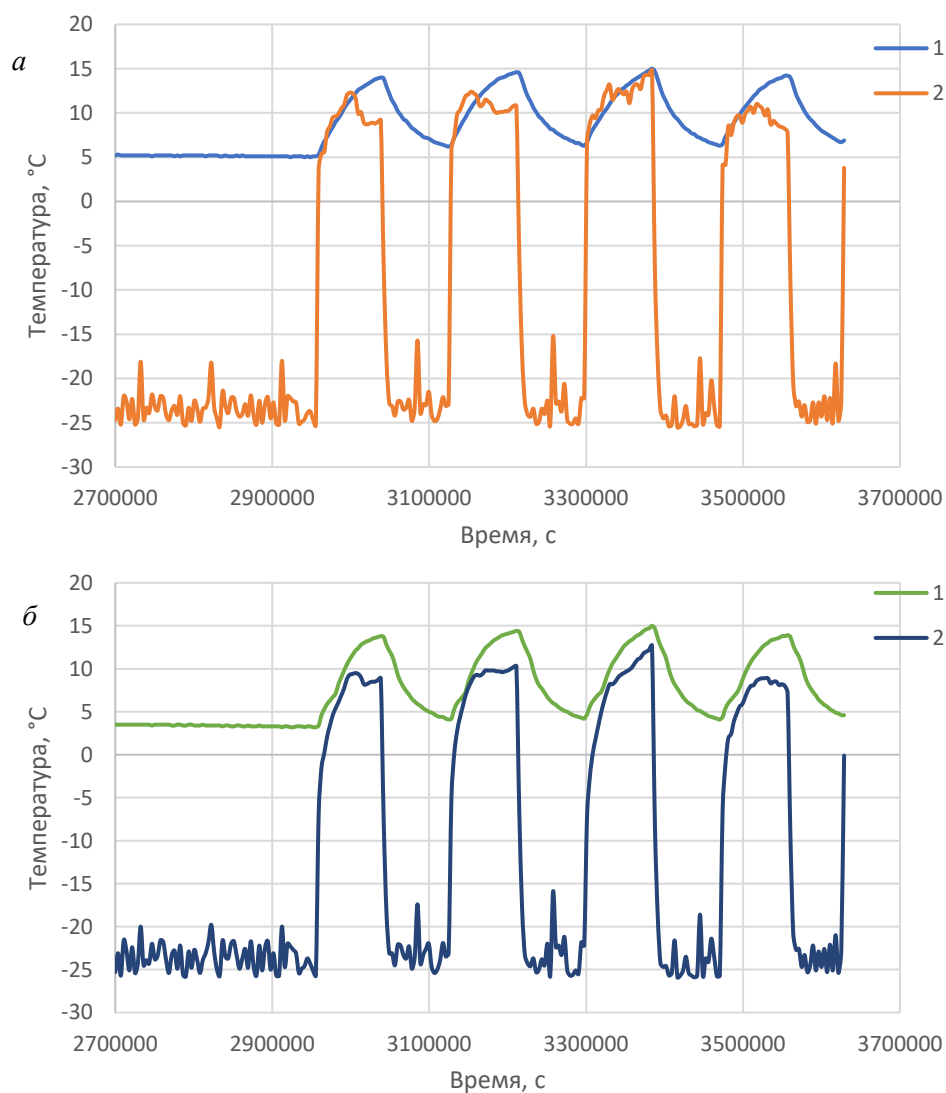


Рис. 3. Графики изменения температуры для образца с XPS (а) и образца с базальтовой ватой (б) в качестве теплоизоляционного слоя:

1 – в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетонных блоков; 2 – на наружной поверхности образца

Fig. 3. Temperature curves for the XPS (a) and basalt wool (b) samples as a thermal insulation layer: 1 –between thermal insulation and aerated concrete block masonry; 2 – on the outer sample surface

Отдельное внимание стоит уделить гармоникам изменения температур (рис. 3, а), которые показывают, что при достижении максимальной температуры на наружной поверхности фрагмента конструкции с теплоизоляцией из XPS значения в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетона остаются стабильными по сравнению с вариантом конструкции с теплоизоляционным слоем из базальтовой ваты (рис. 3, б).

Таким образом, экструзионный пенополистирол в силу лучших теплотехнических показателей при квазистационарном тепловом режиме создает для внутренних конструктивных слоев меньшую амплитуду колебаний температуры, что благоприятно влияет на долговечность конструктивных материалов. При сравнении температур в сечении между кладкой из газобетона и теплоизоляцией (рис. 4) установлено, что при использовании в качестве теплоизоляционного слоя XPS амплитуда колебаний температуры на 22 % меньше, чем в конструкциях с базальтовой ватой.

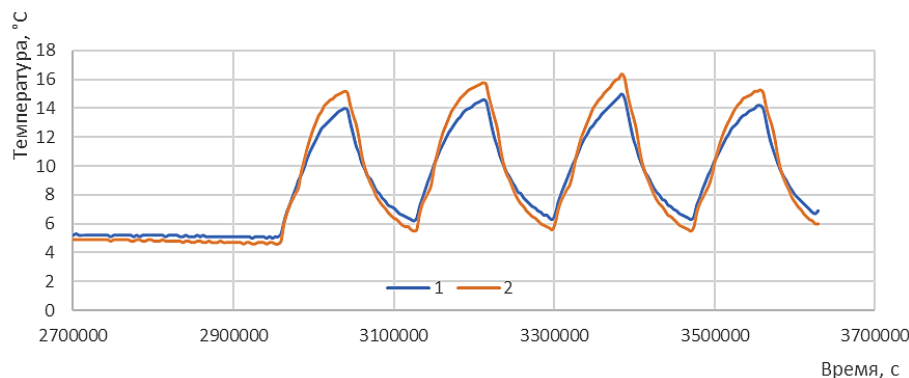


Рис. 4. График изменения температуры в сечении между теплоизоляционным слоем и кладкой из газобетонных блоков для образцов:

1 – с XPS в качестве теплоизоляции; 2 – с базальтовой ватой в качестве теплоизоляции

Fig. 4. Temperature curves for cross-section between heat insulating layer and aerated concrete masonry for samples with different heat insulation:

1 – with XPS; 2 – with basalt wool

При сравнении результатов лабораторных исследований квазистационарного теплового режима фрагмента ограждающей конструкции с различными видами теплоизоляционных материалов установлено, что амплитуда температуры внутренней поверхности фрагмента конструкции с теплоизоляцией из базальтовой ваты  $A_{\text{мин. вата}}$  больше амплитуды температуры фрагмента с теплоизоляцией из XPS на 1,8 °C.

### Результаты теоретических исследований

Теоретические исследования позволили изучить теплотехнические свойства материалов посредством трехмерного моделирования конструкций с теплопроводными включениями при квазистационарном тепловом режиме (рис. 5).

Для подтверждения данных, полученных в ходе лабораторного исследования, и результатов численного моделирования выполнены теплотехнические расчеты исследуемых фрагментов конструкций. Установлено сопротивление теплопередаче на основе теоретических расчетов и выполнено его сравнение с полученными данными с сопротивлением теплопередаче, установленным в лабораторных условиях. Лабораторные исследования сопротивления теплопередаче рассматриваемых фрагментов ограждающих конструкций с теплоизоляционным слоем из базальтовой ваты и XPS проведены согласно ГОСТ Р 56623–2015 «Контроль не-

разрушающий. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций». Выполнена обработка полученных данных, относительная погрешность которых не превышает 5 %.

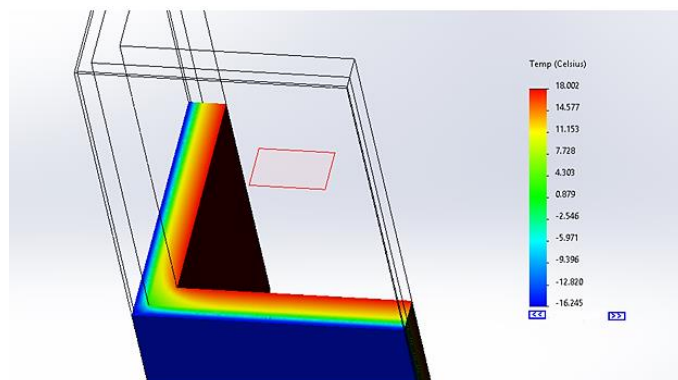


Рис. 5. Общий вид результатов численного моделирования угловой зоны конструкции  
Fig. 5. 3D modeling of the building corner

Установлены коэффициенты теплопроводности исследуемых теплоизоляционных материалов на основании проведенных лабораторных исследований, а также в ходе расчета по методике ГОСТ Р 59985–2022 «Конструкции ограждающие зданий. Методы определения теплотехнических показателей теплоизоляционных материалов и изделий при эксплуатационных условиях». В качестве исходных данных принят коэффициент теплопроводности при температуре  $(10 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$ , установленный в сертифицированной лаборатории, расположенной в г. Кириши.

Сравнительный анализ указанных выше величин представлен в таблице.

#### Сравнительный анализ теплотехнических характеристик базальтовой ваты и XPS

##### Thermal properties of basalt wool and XPS

| №<br>п/п | Характеристика                                                                                                                                    | XPS   | Базальтовая<br>вата |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------|
| 1        | Сопротивление теплопередаче на основе теоретического расчета, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$                                                 | 2,125 | 1,887               |
| 2        | Сопротивление теплопередаче, полученное лабораторным путем, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$                                                   | 1,859 | 1,359               |
| 3        | Разница между сопротивлением теплопередаче, полученным теоретическим расчетом, и сопротивлением по лабораторным исследованиям, %                  | 13    | 28                  |
| 4        | Коэффициент теплопроводности при $(10 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , полученный в сертифицированной лаборатории | 0,033 | 0,035               |
| 5        | Коэффициент теплопроводности при условии эксплуатации «Б» при пересчете по методике ГОСТ Р 59985–2022, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$        | 0,035 | 0,042               |



Окончание таблицы  
End of table

| №<br>п/п | Характеристика                                                                                                                                  | XPS                  | Базальтовая<br>вата  |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 6        | Коэффициент теплопроводности, определенный на основании лабораторных исследований, Вт/(м·К)                                                     | 0,043                | 0,075                |
| 7        | <b>Разница между коэффициентом теплопроводности, полученным по методике ГОСТ Р 59985–2022, и коэффициентом по лабораторным исследованиям, %</b> | <b>19</b>            | <b>44</b>            |
| 8        | Коэффициент температуропроводности, м <sup>2</sup> /ч                                                                                           | $1,37 \cdot 10^{-7}$ | $7,26 \cdot 10^{-7}$ |

В результате численного моделирования двух конструктивных решений фрагментов ограждающих конструкций с теплоизоляционным слоем из XPS и базальтовой ваты в условиях, идентичных лабораторным исследованиям, были получены графики распределения температур во времени для участка стены без теплопроводных включений и для угловой зоны (рис. 6, 7).

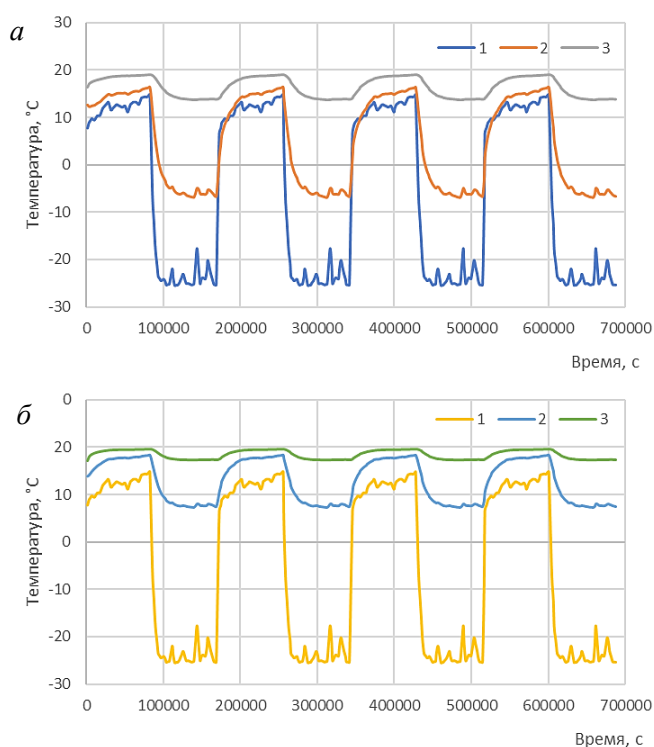


Рис. 6. Графики изменения температуры: а – в угловой зоне; б – в однородной зоне, для образца с XPS в качестве теплоизоляционного слоя в следующих местоположениях: 1 – на наружной поверхности образца; 2 – в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетонных блоков; 3 – на внутренней поверхности

Fig. 6. Time-temperature curves: а – in the corner zone; б – in the homogeneous zone for sample with XPS: 1 – on the outer sample surface; 2 – in the cross-section between heat insulating layer and aerated concrete masonry

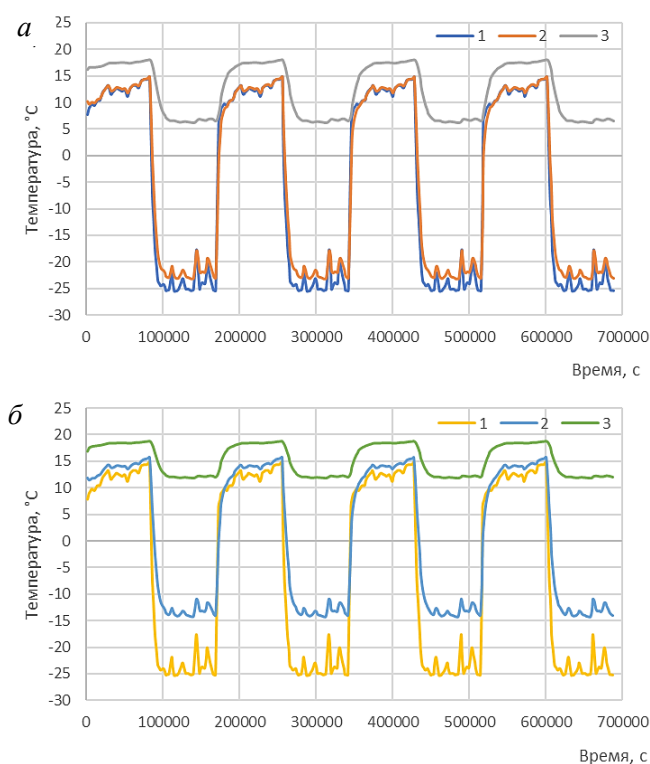


Рис. 7. Графики изменения температуры:

*a* – в угловой зоне; *b* – в однородной зоне, для образца с базальтовой ватой в качестве теплоизоляционного слоя в следующих местоположениях: 1 – на наружной поверхности образца; 2 – в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетонных блоков; 3 – на внутренней поверхности

Fig. 7. Time-temperature curves:

*a* – in the corner zone; *b* – in the homogeneous zone for sample with basalt wool: 1 – on the outer sample surface; 2 – in the cross-section between heat insulating layer and aerated concrete masonry; 3 – on the inner surface

При анализе графиков распределения температур по времени для ограждающей конструкции с теплоизоляционным слоем из XPS на наружной поверхности и в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетона (рис. 6) было установлено, что за счет геометрической формы происходит значительное снижение температуры в слое теплоизоляции угловой зоны с  $+8^{\circ}\text{C}$  до  $-7^{\circ}\text{C}$ , но одновременно с этим наблюдается сохранение низких температур при увеличении температуры на наружной поверхности до  $+12^{\circ}\text{C}$ . Также практически отсутствует запаздывание колебаний температуры во времени вследствие высокой тепловой инерции теплоизоляционного слоя.

При аналогичном численном моделировании квазистационарного теплового режима конструкции с теплоизоляцией из базальтовой ваты на графике на рис. 7, *a* для угловой зоны видно, что амплитуды колебания температуры на наружной поверхности ограждающей конструкции и в сечении между теплоизоляцией и кладкой отличаются на  $\sim 1^{\circ}\text{C}$  в нижней зоне графика изменения

температуры. Для однородного фрагмента конструкции на графике (рис. 7, б) наблюдается уменьшение амплитуды колебаний температуры в сечении между кладкой и теплоизоляционным слоем; при этом, как и для образца с теплоизоляцией из XPS, отсутствует запаздывание теплового потока во времени.

### Заключение

В ходе лабораторных исследований установлены значения сопротивления теплопередаче для базальтовой ваты и XPS, которые отличаются от величин, полученных теоретическим путем. Этот факт указывает на несоответствие коэффициентов теплопроводности, используемых при теоретических исследованиях, и коэффициентов, полученных в ходе лабораторных испытаний.

При этом величина коэффициента теплопроводности для теоретических исследований при условии эксплуатации «Б» была получена по методике ГОСТ Р 59985–2022, исходя из величины коэффициента теплопроводности в сухом состоянии. Это свидетельствует о некорректности коэффициентов теплотехнического качества, участвующих в пересчете коэффициента теплопроводности из сухого состояния в расчетное. Коэффициент теплотехнического качества, принимаемый по табличным данным, имеет только градацию по типу теплоизоляционного материала, однако не учитывает плотность, тип пор, фильтрационные, адсорбционные и абсорбционные характеристики материалов. Значение коэффициента теплотехнического качества необходимо принимать на основании лабораторных исследований. Для базальтовой ваты отклонение коэффициента теплопроводности составило 44 %, для XPS – 19 %.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость выравнивания температуры в различных точках среды, при этом значение коэффициента для базальтовой ваты в 5,3 раза больше значения для XPS. Однако исходя из графиков изменения температуры установлено незначительное смещение колебания температуры во времени, равное  $\pi/40$ . Данное расхождение между ожидаемой скоростью выравнивания температуры в толще теплоизоляции между двумя исследуемыми материалами можно объяснить тем, что данная величина была обозначена для упрощения дифференциального уравнения теплопроводности для одномерного движения тепла. В дальнейших расчетах, связанных с определением величин теплового потока при трехмерной постановке задачи, коэффициент температуропроводности не может являться величиной, характеризующей скорость выравнивания температуры.

Исходя из анализа гармоник колебания температур в сечении между теплоизоляционным слоем и кладкой в конструкциях с теплопроводными включениями видно значительное уменьшение температур по сравнению с конструктивными решениями, не содержащими теплопроводных включений. При этом конструктивные решения с теплоизоляционным слоем из XPS характеризуются более стабильными температурами в толще ограждающей конструкции при квазистационарном тепловом режиме по сравнению с аналогичной конструкцией с теплоизоляцией из базальтовой ваты. Таким образом, вариант с теплоизоляционным слоем из XPS позволит сократить количество циклов перехода через «ноль» для конструктивных материалов, расположенных во внутренней части ограждающей конструкции, что благоприятно скажется на их долговечности и надежности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sisman N., Kahya E., Aras N., Aras H. Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Türkiye's different degreeday regions // *Energy Pol.* 2007. V. 35 (10). P. 5151–5155. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.04.037
2. Ucar A., Balo F. Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls // *Renew. Energy*. 2010. V. 35 (1). P. 88–94. DOI: 10.1016/j.renene.2009.07.009
3. Liu X., Chen Y., Ge H., Fazio P., Chen G., Guo X. Determination of optimum insulation thickness for building walls with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China // *Energy Build.* 2015. V. 109. P. 361–368. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.021
4. Kaynaklı O., Kaynaklı F. Determination of optimum thermal insulation thicknesses for external walls considering the heating, cooling and annual energy requirement // *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 2016. V. 21 (1). P. 227–242. DOI: 10.17482/uufje.27323
5. Kurekci N.A. Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Türkiye's provincial centers // *Energy Build.* 2016. V. 118. P. 197–213. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.004
6. Huang H., Zhou Y., Huang R., Wu H., Sun Y. Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate // *Sustain. Cities Soc.* 2020. V. 52. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101840
7. Verichev K., Serrano-Jimenez A., Carpio M., Barrios-Padura A., Diaz-Lopez C. Influence of degree days calculation methods on the optimum thermal insulation thickness in life-cycle cost analysis for building envelopes in Mediterranean and Semi-Arid climates // *J. Build. Eng.* 2023. V. 79. DOI: 10.1016/j.job.2023.107783
8. Canbolat A.S. An integrated assessment of the financial and environmental impacts of exterior building insulation application // *J. Clean. Prod.* 2024. V. 435. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140376
9. Ozel M. Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials // *Appl. Therm. Eng.* 2011. V. 31 (17–18). P. 3854–3863. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.033
10. Li T., Liu Q., Mao Q., Chen M., Ma C., Wang D., Liu Y. Optimization design research of insulation thickness of exterior wall based on the orientation difference of solar radiation intensity // *Appl. Therm. Eng.* 2023. V. 223. DOI: 10.1021/acsomega.3c06432
11. Zheng Z., Xiao J., Yang Y., Xu F., Zhou J., Liu H. Optimization of exterior wall insulation in office buildings based on wall orientation: economic, energy and carbon saving potential in China // *Energy*. 2024. V. 290. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130300
12. Aktemur C., Tarık Çakır M., Faruk Çakır M. Optimising of thermal insulation thickness based on wall orientations and solar radiation using heating-degree hour method // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. V. 60. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104725
13. Белоус А.Н., Оверченко М.В., Выборнов Д.В. Моделирование теплового режима учебного помещения. Проблемы и перспективы // *Строитель Донбасса*. 2022. № 3 (20). С. 68–72. EDN: QFJCGM
14. Оверченко М.В. Анализ факторов, влияющих на выбор систем утепления образовательных учреждений // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 1. С. 24–31. EDN: ZELWDB
15. Белоус А.Н., Оверченко М.В., Белоус О.Е. Разработка теплотехнического измерительного комплекса // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. Т. 22. № 1. С. 140–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-140-151. EDN JUMCRT
16. Белоус А.Н., Оверченко М.В., Белоус О.Е. Утепление цокольного узла зданий с неотапливаемым подвалом // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. №11 (50). С. 7–21. DOI: 10.18720/CUBS.50.1. EDN YGHSLN

## REFERENCES

1. Sisman N., Kahya E., Aras N., Aras H. Determination of Optimum Insulation Thicknesses of the External Walls and Roof (Ceiling) for Türkiye's Different Degree Day Regions. *Energy Policy*. 2007; 35 (10): 5151–5155. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.04.037

2. Ucar A., Balo F. Determination of the Energy Savings and the Optimum Insulation Thickness in the Four Different Insulated Exterior Walls. *Renewable Energy*. 2010; 35 (1): 88–94. DOI: 10.1016/j.renene.2009.07.009
3. Liu X., Chen Y., Ge H., Fazio P., Chen G., Guo X. Determination of Optimum Insulation Thickness for Building Walls with Moisture Transfer in Hot Summer and Cold Winter Zone of China. *Energy and Buildings*. 2015; 109: 361–368. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.021
4. Kaynaklı O., Kaynaklı F. Determination of Optimum Thermal Insulation Thicknesses for External Walls Considering the Heating, Cooling and Annual Energy Requirement. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 2016; 21 (1): 227–242. DOI: 10.17482/uujfe.27323
5. Kurekci N.A. Determination of Optimum Insulation Thickness for Building Walls by using Heating and Cooling Degree-Day Values of all Türkiye's Provincial Centers. *Energy and Buildings*. 2016; 118: 197–213. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.004
6. Huang H., Zhou Y., Huang R., Wu H., Sun Y. Optimum Insulation Thicknesses and Energy Conservation of Building Thermal Insulation Materials in Chinese Zone of Humid Subtropical Climate. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 52. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101840
7. Verichev K., Serrano-Jimenez A., Carpio M., Barrios-Padura A., Diaz-Lopez C. Influence of Degree Days Calculation Methods on the Optimum Thermal Insulation Thickness in Life-Cycle Cost Analysis for Building Envelopes in Mediterranean and Semi-Arid Climates. *Journal of Building Engineering*. 2023; 79. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107783
8. Canbolat A.S. An Integrated Assessment of the Financial and Environmental Impacts of Exterior Building Insulation Application. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 435. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140376
9. Ozel M. Thermal Performance and Optimum Insulation Thickness of Building Walls with Different Structure Materials. *Applied Thermal Engineering*. 2011; 31 (17–18): 3854–3863. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.033
10. Li T., Liu Q., Mao Q., Chen M., Ma C., Wang D., Liu Y. Optimization Design Research of Insulation Thickness of Exterior Wall based on the Orientation Difference of Solar Radiation Intensity. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 223. DOI: 10.1021/acsomega.3c06432
11. Zheng Z., Xiao J., Yang Y., Xu F., Zhou J., Liu H. Optimization of Exterior Wall Insulation in Office Buildings based on Wall Orientation: Economic, Energy and Carbon Saving Potential in China. *Energy*. 2024; 290. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130300
12. Aktemur C., Tarık Çakır M., Faruk Çakır M. Optimising of Thermal Insulation Thickness based on Wall Orientations and Solar Radiation using Heating-Degree Hour Method. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 60. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104725
13. Belous A.N., Overchenko M.V., Vybornov D.V. Modeling of Thermal Conditions for Study Room. *Problemy i perspektivy. Stroitel' Donbassa*. 2022; 3 (20): 68–72. EDN: QFJCGM (In Russian)
14. Overchenko M.V. Analysis of Factors Influencing the Choice of Insulation Systems for Educational Institutions. *Stroitel'nye materialy i izdelya*. 2019; 2 (1): 24–31. EDN: ZELWDB (In Russian)
15. Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Portable Heat Metering System Design. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22. (1): 140–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-140-151. EDN: JUMCRT (In Russian)
16. Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Ground Floor Insulation of Buildings with Non-heated Basements. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2016; 11 (50): 7–21. DOI: 10.18720/CUBS.50.1. EDN YGHSLN (In Russian)

#### Сведения об авторах

Белоус Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, зам. руководителя по проектированию, ООО «ГДЦ-Развитие», 123104, г. Москва, ул. Большая Бронная, 25, us28@ya.ru

Оверченко Мира Викторовна, канд. техн. наук, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, m.v.overchenko@donnasa.ru

Бегич Ясмин Эдинович, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, y.begich@Penoplex.ru

*Белоус Ольга Евгениевна*, ассистент, Донской государственный технический университет, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ol-0929@mail.ru

*Еникеев Артем Искандарович*, магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, enikeev.ai@edu.spbstu.ru

#### **Authors Details**

*Aleksei N. Belous*, PhD, A/Professor, ООО “GDTs-Razvitie”, 25, Bol'shaya Bronnaya Str., 123104, Moscow Russia, us28@ya.ru

*Mira V. Overchenko*, PhD, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, Russia, m.v.overchenko@donnasa.ru

*Yasmin E. Begich*, Research Assistant, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, y.begich@Penoplex.ru

*Ol'ga E. Belous*, Assistant Lecturer, Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., 344000, Rostov-on-Don, Russia, ol-0929@mail.ru

*Artem I. Enikeev*, Graduate Student, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, enikeev.ai@edu.spbstu.ru

#### **Вклад авторов**

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

#### **Authors contributions**

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

Статья поступила в редакцию 24.03.2025  
Одобрена после рецензирования 17.09.2025  
Принята к публикации 17.09.2025

Submitted for publication 24.03.2025  
Approved after review 17.09.2025  
Accepted for publication 17.09.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 200–210.

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 (5): 200–210.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.577

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-200-210

EDN: RDZSHW

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В ГОРОДЕ ПЕРМИ

**Владимир Сергеевич Ивашкин, Александр Иванович Бурков**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

**Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос применения теплонасосной установки в индивидуальном жилом доме в г. Перми. Представлены законодательные документы, обосновывающие использование альтернативной и возобновляемой энергетики.

**Актуальность** настоящего исследования обусловлена повышением значимости экономии природных ресурсов и, соответственно, их меньшего расхода. Вопрос постепенного увеличения потребности в тепловой энергии возможно решить благодаря использованию альтернативных источников энергии.

**Целью** работы является анализ полученных данных мониторинга параметров теплонасосной установки и рассмотрение вопроса эффективности применения теплонасосной установки в условиях г. Перми.

**Результаты.** Проведен анализ применения теплонасосных установок как в России, так и в других странах. Представлены данные, полученные в результате мониторинга параметров теплонасосной установки и проведен их анализ. На основании результатов мониторинга оценена эффективность использования теплонасосной установки в зимний период года. Проведена экономическая оценка геотермальной системы отопления в здании в сравнении с другими наиболее распространенными аналогами с учетом климатических условий. Рассчитан период окупаемости системы отопления с применением теплового насоса, рассмотрены факторы, оказывающие влияние на его длительную работу в системе отопления.

**Ключевые слова:** теплонасосная установка, тепловой насос, энергоэффективность, теплоснабжение, альтернативные источники энергии, источники низкопотенциальной энергии

**Для цитирования:** Ивашкин В.С., Бурков А.И. Применение теплонасосной установки в городе Перми // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 200–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-200-210. EDN: RDZSHW

## ORIGINAL ARTICLE

## HEAT PUMP SYSTEM APPLICATION IN THE CITY OF PERM

**Vladimir S. Ivashkin, Aleksandr I. Burkov**

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*

**Abstract.** The relevance of this study is due to the increasing importance of saving natural resources and, accordingly, their lower consumption. The growing need for thermal energy can



be solved through the use of alternative energy sources. The article considers the application of the heat pump system in an individual residential building in Perm. Legislative documents substantiating the use of alternative and renewable energy are presented.

*Purpose:* The analysis of the data obtained for parameter monitoring of the heat pump system and consideration of the efficiency of using it in Perm.

*Research findings:* The analysis of the heat pump system application is provided for Russia and other countries. The obtained parameters of monitoring the heat pump system are presented and analyzed. Based on the results, the efficiency of using the heat pump system in winter is assessed. With respect to climatic conditions, the economic evaluation is conducted for the geothermal heating system in the building in comparison with other most common analogs. The payback period is calculated for the heating system with a heat pump. Factors influencing the long-term operation of the heat pump in the heating system are considered herein.

**Keywords:** heat pump system, energy efficiency, heat supply, alternative energy sources, low-potential energy

**For citation:** Ivashkin V.S., Burkov A.I. Heat Pump System Application in the City of Perm. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 200–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-200-210. EDN: RDZSHW

### Введение

В течение последних 20–30 лет спрос на тепловые ресурсы стабильно растёт. Соответственно, растёт и предложение, что стимулирует к развитию новых технологий в области теплоснабжения и улучшению уже существующих. В последнее десятилетие наблюдается тенденция к переходу от традиционных источников энергии к альтернативным. Данная тенденция связана с несколькими факторами, такими как истощаемость природных ресурсов, изменение стоимости различных ресурсов и соответствующих установок для теплогенерации, экологическая составляющая и др.

Применение альтернативных источников энергии позволяет решать многие вопросы. В частности, появляется возможность создавать установки для автономного энергоснабжения, что является более рациональным решением, например, при условиях удалённости от централизованных систем. Кроме того, подобные установки способны конкурировать с традиционными системами энергоснабжения, т. к. могут быть энергоэффективными, экономичными и экологичными.

Одним из решений в области теплоснабжения зданий является применение теплонасосных установок. Теплонасосные установки позволяют использовать возобновляемые источники энергии и вторичные энергоресурсы, при этом обеспечивая требуемые параметры для теплоснабжения здания. По тематике теплонасосных установок проводится множество исследований, в том числе с точки зрения экономической эффективности, экологической эффективности, возможности использования в совокупности с другими возобновляемыми источниками энергии [1–3].

В настоящее время в нашей стране значительно усилилось внимание к вопросам энергосбережения, в частности, в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Разрабатывается государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» на период до 2035 г. 26 октября 2023 г. была подписана Климатическая доктрина РФ, в которой сделан акцент на развитии использова-

ния возобновляемых и альтернативных источников энергии. Кроме того, существует множество законодательных актов, способствующих внедрению возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. К ним относятся федеральные законы, указы президента РФ, постановления правительства РФ, приказы Министерства энергетики РФ и т. д. [4].

Объектом исследования является геотермальный тепловой насос NIBE F1245-8.

Цель исследования – получение данных, необходимых для расчета.

Задачи исследования:

- изучение технического решения системы отопления объекта;
- проведение измерений необходимых показателей;
- анализ полученных результатов;
- экономическая оценка наиболее распространенных систем отопления

для данного объекта.

### Низкопотенциальная тепловая энергия

Под низкопотенциальными источниками энергии понимаются такие энергетические ресурсы, у которых относительно низкая температура и относительно большой объем. Принципиально можно выделить 2 группы источников низкопотенциальной тепловой энергии: естественные (возобновляемые источники энергии) и искусственные (вторичные энергетические ресурсы). К возобновляемым источникам энергии относятся: окружающий воздух, грунтовые и геотермальные воды, природные воды (реки, моря и др.), солнечная энергия, грунт. К вторичным энергетическим ресурсам относятся: канализационные стоки, вентиляционные выбросы, теплота технологических процессов и др.

Кроме того, можно выделить 3 источника низкопотенциальной энергии: воздух, вода, грунт. Особенности использования воздуха являются переменная температура и низкие значения коэффициента теплоотдачи, что является относительным недостатком применения воздуха в качестве источника теплоты. В свою очередь, применение воды может быть более выгодным, в особенности если рассматривать водный источник, расположенный на относительно большой глубине. В таком случае температура воды в течение года будет более стабильна, чем в случае с воздухом. В свою очередь, преимуществами грунта являются его доступность и относительно стабильная температура в течение года. Теплоту грунта используют в летний период для кондиционирования, а в зимний – для отопления. Таким образом, можно поддерживать баланс отдаваемого и забираемого тепла из грунта в течение года [5].

### Теплонасосная установка

Теплонасосная установка представляет собой устройство, предназначенное для использования энергии, получаемой от источника тепла, в частности от источника низкопотенциальной тепловой энергии, и передачи тепловой энергии к потребителю. Эффективность теплонасосной установки зависит от многих параметров, в том числе от характеристик самой установки, источника тепловой энергии и пр. С каждым годом все чаще подвергаются сравнению системы отопления с использованием тепловых насосов и газовых котлов. При

больших первоначальных затратах на установку теплового насоса и грунтового теплообменника в долгосрочной перспективе такое оборудование экономически более выгодно, чем использование газовых установок [6–8]. При этом если существует возможность подключения к централизованной системе отопления, то должна быть проведена оценка экономической эффективности применения теплонасосных установок в сравнении с централизованным отоплением. Исследования показывают, что оптимальным может быть совместное применение вышеперечисленных источников тепловой энергии за счет их использования в разное время [9].

Тепловые насосы получили относительно широкое распространение в мире. Так, более 40 лет тепловые насосы применяются в США, Швеции, Финляндии и ряде других стран. Кроме того, существуют различные государственные программы, например, в Германии предусмотрена дотация на установку теплового насоса. В Италии предусмотрен налоговый вычет 65 % для расходов на повышение энергоэффективности зданий [10].

В настоящее время в России тепловые насосы применяются как альтернатива другим видам теплоснабжения на различного рода объектах. При этом в качестве источника низкопотенциальной энергии используются грунтовые воды, сбросные воды, питьевая вода из водозабора, сбросная технологическая вода, термальная вода, системы охлаждения турбин и др. [11, 12].

При использовании грунта в качестве источника низкопотенциальной энергии тепло из грунта извлекается горизонтальным или вертикальным теплообменником, сделанным из труб, называемых коллектором. Тепло передается в насос рассолом. Горизонтальный коллектор требует больших площадей на участке установки и проведения большого объема земляных работ. Для вертикального коллектора, в свою очередь, необходимы большие расходы на бурение скважин, т. к. подобные теплообменники достигают глубин 50 м и более [13].

Исследования, проведенные в Швейцарии, показали, что для вертикальных грунтовых теплообменников влияние солнечной радиации и температуры воздуха происходит на глубине вплоть до 15 м. Таким образом, наблюдалось изменение температуры грунтового массива на глубине более 15 м для оценки влияния постоянного забора тепла на грунтовый массив в течение длительного времени. Было определено, что температура грунта начинает постепенно уменьшаться, а грунтовый массив, подверженный понижению температуры, постепенно увеличивается. Следовательно, снижается эффективность работы теплонасосной установки. В связи с этим появляется необходимость соблюдения теплового баланса грунта, для чего в летний период года из грунта забирается тепло. Такой подход позволяет сохранять среднюю температуру грунта в течение года. Кроме того, в этом случае сохраняется эффективность работы теплонасосной установки как в зимний период года, так и в летний [14].

Применение теплонасосных установок возможно как для новых зданий, так и для существующих, в том числе частных жилых, многоквартирных, административных, производственных. Однако стоит учитывать, что эффективность теплонасосной установки зависит от многих факторов, часть из которых связана непосредственно с самим зданием и потребностью в тепловых ресурсах для этого здания. Зарубежные исследования в странах с опытом применения теплонасос-

ных установок в системах отопления показывают, что не всегда можно однозначно определить критерии даже для типовых серий зданий и могут потребоваться дополнительные вложения в каждом индивидуальном случае [15].

### Экспериментальная часть

Экспериментальные измерения проводились на объекте в г. Перми, в микрорайоне Ива-1. Период регистрации данных – с 27.12.2022 г. по 08.08.2023 г.

Объект представляет собой индивидуальный жилой дом площадью 159 м<sup>2</sup>. Система отопления выполнена с применением технологии теплого пола. Источником тепла для системы отопления является геотермальный тепловой насос NIBE F1245-8 мощностью 8 кВт с встроенным электрическим котлом. В качестве грунтового коллектора проектом предусмотрены 3 скважины по 55 м в глубину каждая, в которых проложены трубы ПНД Ø40 мм. В качестве теплоносителя для системы отопления применяется вода. Бетонная система теплого пола двухтрубная, с нижней разводкой. В качестве нагревательных приборов системы напольного отопления используются полиэтиленовые трубопроводы РЕХ с EVON Ø16 мм. Всего проектом заложено 19 петель с общей длиной 920 м.

Визуальное представление данных было получено в программе NIBE Uplink. Перечень параметров с описанием и средним количеством измерений в день представлено в табл. 1. Среднее количество измерений в день для каждого параметра разное, т. к. каждый датчик производит запись, когда значение изменяется на определенный процент от текущего, следовательно, чем меньше изменяется параметр, тем меньше произведено измерений.

Таблица 1

### Параметры теплового насоса

Table 1

#### Heat pump parameters

| Датчик          | Описание                                         | Среднее кол-во измерений в день |
|-----------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|
| BT7             | Температура в верхней части водонагревателя      | 6                               |
| BT6             | Температура в середине водонагревателя           | 5                               |
| BT1             | Датчик температуры снаружи                       | 31                              |
| BT50            | Датчик температуры в помещении                   | 6                               |
| BT2             | Датчики температуры потока теплоносителя         | 47                              |
| S1              | Расчетная температура подачи                     | 18                              |
| EB100-EP14-BT3  | Датчики температуры возврата теплоносителя       | 35                              |
| EB100-EP14-BT10 | Температура теплоносителя на входе в установку   | 45                              |
| EB100-EP14-BT11 | Температура теплоносителя на выходе из установки | 42                              |
| EB100-EP14      | Время работы компрессора                         | 13                              |

## Результаты

Чтобы оценить эффективность работы теплового насоса, рассмотрим показатели температуры в помещении и снаружи на рис. 1.

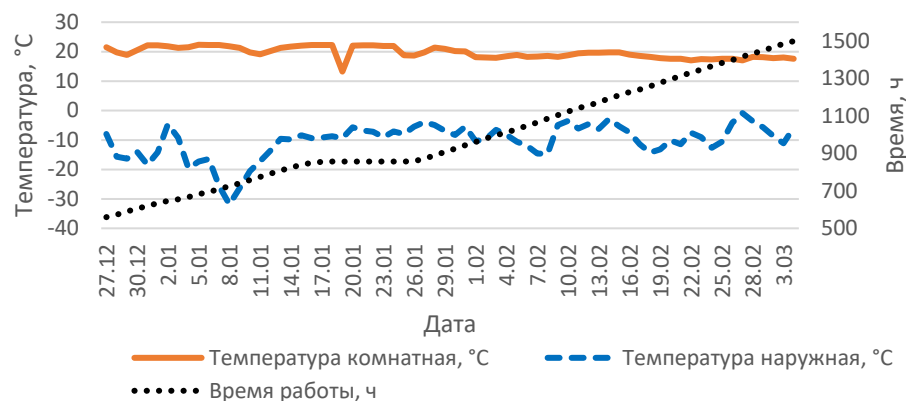


Рис. 1. Графики внутренней и наружной температуры, время работы установки  
Fig. 1. Dependences between internal and external temperatures and the system operating time

На графике представлены данные за период с 27.12.2022 г. по 03.03.2023 г. В этот промежуток времени температура воздуха в здании была в пределах 18–23 °С, кроме 19.01.2023 г., когда температура опустилась до 13,2 °С. Данный спад связан с тем, что 18.01.2023 г. тепловой насос отключился из-за автоматики в связи с техническими неполадками. Как видно из графика времени работы, тепловой насос не работал с 18.01.2023 г. по 25.01.2023 г., в это время в здании использовался резервный источник теплоснабжения, вследствие чего спад температуры наблюдался в течение всего одного дня. Теплонасосная установка показала свою эффективность при различных температурах воздуха в зимний период, которая варьировалась в промежутке от –0,9 °С до –36,7 °С. В течение всего периода работы теплового насоса в здании обеспечивалась расчетная температура воздуха. За период измерений тепловой насос проработал 940 ч за 67 дней. Время работы теплового насоса по дням представлено на рис. 2.

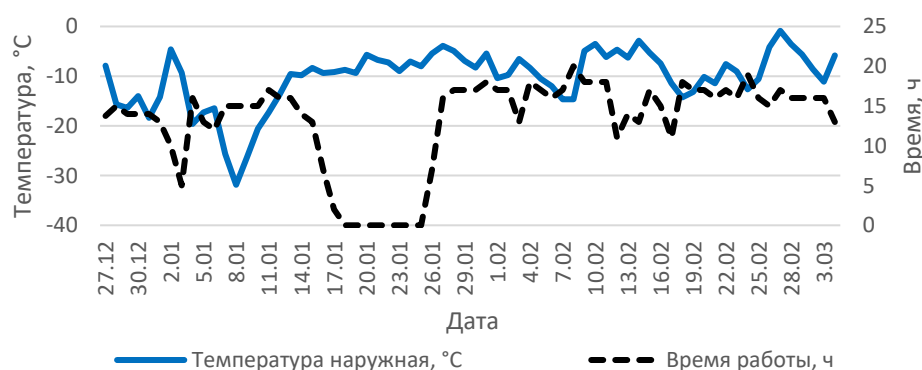


Рис. 2. Время работы теплового насоса  
Fig. 2. Heat pump operating time

Как видно из графика, тепловой насос в среднем работал 10–19 ч в день. Кроме того, в период работы теплового насоса можно наблюдать обратно пропорциональную зависимость между температурой воздуха и временем работы теплового насоса. Наиболее наглядно это видно с 01.01.2023 г. по 03.01.2023 г. В этот период средняя температура наружного воздуха увеличилась с  $-14^{\circ}\text{C}$  до  $-4,6^{\circ}\text{C}$ , следовательно, потребность в тепловых ресурсах в этот период уменьшилась, и время работы теплового насоса сократилось с 13 до 5 ч в день.

С точки зрения экономической эффективности стоит рассмотреть геотермальную систему отопления в сравнении с другими наиболее распространенными системами. Такими в Пермском крае для индивидуальных жилых домов являются электрическая и газовая системы отопления. В соответствии с этим был произведен расчет и сравнительный анализ данных систем.

Согласно расчету, нагрузка на систему отопления составляет 8,2 кВт. По проекту для геотермальной системы отопления подобран тепловой насос NIBE F1245-8 мощностью 8 кВт. Подберем примерно аналогичные по мощности устройства для альтернативных систем отопления. Для использования природного газа выбран газовый котел Fondital MINORCA CTFS 15, удовлетворяющий требованиям по площади здания и мощности системы отопления. Стоимость каждой системы рассматривалась под ключ и составила: для геотермального отопления  $\sim 1\,100\,000$  руб., для газового отопления – 329 011,76 руб., для электрического отопления (электрические конвекторы)  $\sim 350\,000$  руб.

Стоимость установки системы газового отопления была получена при помощи калькулятора «Газпром газораспределение», в котором учитывается стоимость оборудования и монтажа [16]. Стоимость установки геотермального отопления была получена исходя из данных проекта с учетом изменения цен на 3-й квартал 2023 г. Стоимость установки электрического оборудования была получена из текущих цен на оборудование, монтажные и пусконаладочные работы.

Кроме стоимости установки системы отопления, также необходимо учитывать эксплуатационные затраты. Для газового отопления было принято: расход природного газа –  $6000\text{ м}^3$  (число может варьироваться в пределах  $4500\text{--}6500\text{ м}^3$  для данного здания), стоимость газа –  $5,93\text{ руб/м}^3$  при условии наличия счетчика, замена котла – каждые 10 лет [17]. Для электрического отопления: замена котла – каждые 5 лет. Стоимость электроэнергии –  $3,71\text{ руб/кВт}$  при одноставочном тарифе и наличии электроплиты и стоимость электроэнергии –  $5,05\text{ руб/кВт}$  при одноставочном тарифе и подключении газа в здании [18]. Кроме того, для расчета была учтена инфляция в размере 7,5 % (средняя за 10 лет). Расчет был произведен на срок 20 лет, т. к. это средний срок службы геотермального оборудования. Результаты расчета приведены на рис. 3.

Из графика следует, что лучшими вариантами являются газовое и геотермальное отопления. В аналогичных исследованиях прошлых годов период окупаемости геотермального отопления составляет около 10 лет. При этом период окупаемости геотермального отопления для данного здания составляет 18–19 лет. Это связано с несколькими факторами, в том числе с текущей экономической ситуацией, из-за чего стоимость иностранных тепловых насосов значительно увеличилась. Кроме того, стоит учесть, что сравнение проводилось с уже установленным тепловым насосом. Если на сегодняшний день подбирать аналогичный по

параметрам насос, то можно найти насос тех же характеристик, но меньшей стоимости, что уменьшит период окупаемости на несколько лет.

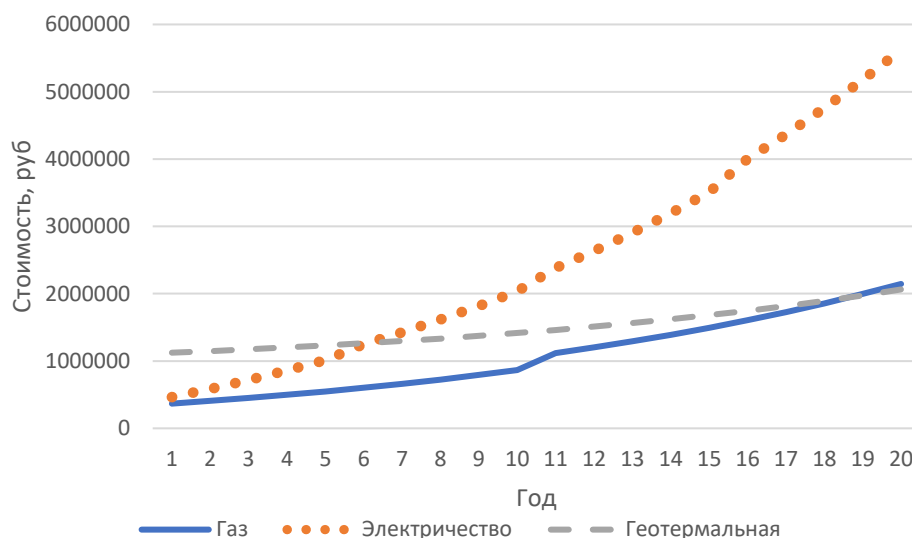


Рис. 3. Расходы на установку и эксплуатацию систем отопления по годам  
Fig. 3. Fiscal year comparison of installation and operation costs of heating systems

В долгосрочной перспективе необходимо предусматривать ряд факторов. В первую очередь стоит учитывать, что разработка и производство отечественных тепловых насосов ведется постоянно, следовательно, повышается их надежность и эксплуатационные характеристики и понижается стоимость в процентном соотношении относительно роста стоимости альтернативных вариантов систем отопления. Кроме того, уменьшить эксплуатационные расходы можно при переходе с одноставочного тарифа на тариф, дифференцированный по двум или трем зонам суток в совокупности с установкой бака аккумулятора тепловой энергии. Таким образом можно производить тепло в период суток с наименьшей стоимостью электроэнергии, накапливать его и расходовать в период потребности в тепловой энергии. Другим важным фактором является то, что наблюдается тенденция на увеличение стоимости природного газа из-за его ограниченных запасов и изменение цены на электроэнергию из-за нарастающего использования альтернативных источников энергии. Так, например, в европейских странах наблюдается тенденция на снижение стоимости электроэнергии при ее перепроизводстве альтернативными источниками. Эти факторы приводят к тому, что период окупаемости геотермальной установки может сократиться еще на 3–7 лет в ближайшие десятилетия.

При сравнении газовой и геотермальной систем отопления стоит отметить, что при относительно одинаковых затратах в промежутке 20 лет у геотермального отопления есть два преимущества. Первое – это возможность устройства такой системы практически на любой территории, т. е. автономность установки. Второе – возможность использования теплого насоса в летний период года для холодоснабжения здания, при этом в грунт будет возвращаться тепло,



которое отбиралось в зимний период времени, что в долгосрочной перспективе позволит сохранить тепловой баланс в области скважин.

### Заключение

Альтернативные и возобновляемые источники энергии имеют большой потенциал для применения в современных установках обеспечения тепловой энергией. На сегодняшний день уже существует опыт использования подобных установок во многих странах и на различных объектах, начиная от небольших зданий, заканчивая применением установок в централизованном отоплении крупных городов.

Результаты измерений на объекте, расположенном в г. Перми, показали, что теплонасосная установка в совокупности с теплым полом может обеспечивать требуемые параметры микроклимата в здании. Соответственно, в данных климатических условиях использование теплонасосной установки в качестве единственного источника тепловой энергии может быть оправданно. С экономической точки зрения теплонасосная установка сравнима с газовой установкой в долгосрочной перспективе. Однако теплонасосная установка может применяться для холодоснабжения в теплый период года, что является весомым преимуществом.

Использование теплонасосных установок в России может быть обоснованно при разных климатических, географических и прочих условиях. Исходя из отечественного и зарубежного опыта, можно сделать вывод, что при рациональном применении теплонасосных установок они способны обеспечивать потребителей относительно экономичной, экологичной, стабильной тепловой энергией.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Martínez-Rodríguez G., Baltazar J-C., Fuentes-Silva A.* Heat and electric power production using heat pumps assisted with solar thermal energy for industrial applications // *Energy*. 2023. V. 282. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128379
2. *Kijo-Kleczkowska A., Brus P., Więciorkowski G.* Economic analysis of heat pump exploitation – A case study // *Energy*. 2023. V. 280. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128184
3. *Srinivas T., Saxena A., Baba S.V., Kukreja R.* Experimental and simulation studies on heat pump integration two stage desalination and cooling system // *Energy Nexus*. 2023. V. 11. DOI: 10.1016/j.nexus.2023.100221
4. *Соколов В.Ю., Митрофанов С.В., Наумов С.А., Садчиков А.В.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Оренбург : ОГУ, 2019. 145 с.
5. *Дзино А.А., Малинина О.С.* Тепловые насосы. Санкт-Петербург : ИТМО, 2016. 43 с.
6. *Легких Б.М.* Экономическая эффективность использования тепловых насосов в жилом строительстве // *Научные труды Вольного экономического общества России*. 2020. Т. 224. № 4. С. 421–434. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-224-4-421-434
7. *Гурина Е.В., Хорошева Л.Н.* Экономическая эффективность использования геотермального отопления в уральских условиях на примере г. Перми // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2023. № 1. С. 53–63. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.01.05
8. *Мохова А.А., Зекин В.Н.* Эффективность применения теплового насоса в домах усадебного типа // *Вестник науки*. 2022. Т. 3. № 11. С. 252–263. EDN: EKHLZF
9. *Pesola A.* Cost-optimization model to design and operate hybrid heating systems – Case study of district heating system with decentralized heat pumps in Finland // *Energy*. 2023. V. 281. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128241

10. Шестернёва А.М., Титаренко О.Н., Скакун Г.С. Актуальность замены действующей отопительной котельной на теплонасосную установку // Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 1. С. 71–77.
11. Трубаев П.А. Тепловые насосы. Белгород : Изд-во БГТУ, 2010. 143 с.
12. Аникина И.Д., Сергеев В.В., Амосов Н.Т. Оценка потенциала вторичных источников низкопотенциальной теплоты ТЭЦ с целью использования в теплонасосных установках // Неделя науки СПбПУ. Санкт-Петербург, 2016. С. 3–5.
13. Кайсын С., Швец А., Халаим Н. Возобновляемые источники энергии. Кишинев : [б. и.], 2015. 188 с.
14. Амерханов Р.А., Кириченко А.С., Усков А.Е., Соболев А.Н. Теплонасосные установки. Москва : ООО «Инновационное машиностроение», 2022. 258 с.
15. Terry N., Galvin R. How do heat demand and energy consumption change when households transition from gas boilers to heat pumps in the UK // Energy & Buildings. 2023. V. 292. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113183
16. Предварительный расчет стоимости газификации // Газпром газораспределение Пермь : [сайт]. URL: <https://www.ugaz.ru/ks/kalkulyator/> (дата обращения: 24.10.2023).
17. Тарифы // Газпром межрегионгаз Пермь : [сайт]. – URL: <https://www.permrg.ru/abonents/ptl/> (дата обращения: 24.10.2023).
18. Тарифы для населения и приравненных к нему категорий 2023 // Пермэнергосбыт : [сайт]. URL: <https://permenenergobyt.ru/populations/tarify-dlya-naseleniya-i-priravennyh-k-nemu-kategoriy-2023/> (дата обращения: 24.10.2023).

#### REFERENCES

1. Martínez-Rodríguez G., Baltazar J-C., Fuentes-Silva A. Heat and Electric Power Production using Heat Pumps Assisted with Solar Thermal Energy for Industrial Applications. *Energy*. 2023; 282. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128379
2. Kijo-Kleczkowska A., Brus P., Więciorkowski G. Economic Analysis of Heat Pump Exploitation – A Case Study. *Energy*. 2023; 280. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128184
3. Srinivas T., Saxena A., Baba S.V., Kukreja R. Experimental and Simulation Studies of Heat Pump Integration Two Stage Desalination and Cooling System. *Energy Nexus*. 2023; 11: 100221. DOI: 10.1016/j.nexus.2023.100221
4. Sokolov V.Yu., Mitrofanov S.V., Naumov S.A., Sadchikov A.V. Non-Traditional and Renewable Energy Sources. 2019. 145 p. (In Russian)
5. Dzino A.A., Malinina O.S. Heat Pumps. Saint-Petersburg, 2016. 43 p. (In Russian)
6. Legkikh B.M. Economic Efficiency of Heat Pumps and Residential Construction. *Nauchnyye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii*. 2020; 224 (4): 421–434. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-224-4-421-434 (In Russian)
7. Gurina Ye.V., Khorosheva L.N. Economic Efficiency of Geothermal Heat used in the Ural Conditions in Perm. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2023; 1: 53–63. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.01.05. (In Russian)
8. Mokhova A.A., Zekin V.N. Heat Pump Efficiency in Manor-Type Houses. *Vestnik nauki*. 2022; 3 (11): 252–263. (In Russian)
9. Pesola A. Cost-Optimization Model to Design and Operate Hybrid Heating Systems – Case Study of District Heating System with Decentralized Heat Pumps in Finland. *Energy*. 2023; 281. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128241
10. Shesternova A.M., Titarenko O.N., Skakun G.S. Relevance of Replacing Heating Boiler House with Heat Pump Unit. *Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii*. 2022; 8 (1): 71–77. (In Russian)
11. Trubayev P.A. Heat Pumps. Belgorod, 2010. 143 p. (In Russian)
12. Anikina I.D., Sergeyev V.V., Amosov N.T. The Potential for Secondary Sources of Low-Grade Heat from TPS for Heat Pump Installations. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Science Week at the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University'*, Saint-Petersburg, 2016. Pp. 3–5. (In Russian)
13. Kaysyn S., Shvets A., Khalaim N. Renewable Energy Sources. Kishinev: “Bons Offices”, 2015. 188 p. (In Russian)

14. Amerkhanov R.A., Kirichenko A.S., Uskov A.Ye., Sobol' A.N. Heat Pump Installations. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2022. 258 p. (In Russian)
15. Terry N., Galvin R. How do Heat Demand and Energy Consumption Change when Households Transition from Gas Boilers to Heat Pumps in the UK. *Energy & Buildings*. 2023; 292: 113183. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113183
16. Preliminary cost calculation of gasification. Available: [www.ugaz.ru/ks/kalkulyator/](http://www.ugaz.ru/ks/kalkulyator/) (accessed 24 October 2023). (In Russian)
17. Tariffs - Gazprom Mezhhregiongaz Perm. Available: [www.permrg.ru/abonents/ptl/](http://www.permrg.ru/abonents/ptl/) (accessed 24 October 2023). (In Russian)
18. Tariffs – PAO Permenergosbyt. Available: <https://permenergosbyt.ru/populations/tarify-dlya-naseleniya-i-priravneniyh-k-nemu-kategoriy-2023/> (accessed 24 October 2023). (In Russian)

#### Сведения об авторах

*Ивашкин Владимир Сергеевич*, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [vladimirivashkin@ya.ru](mailto:vladimirivashkin@ya.ru)

*Бурков Александр Иванович*, канд. техн. наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [ale-burkov1@ya.ru](mailto:ale-burkov1@ya.ru)

#### Authors Details

*Vladimir S. Ivashkin*, Research Assistant, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomol'skii Ave., 614990, Perm, Russia, [vladimirivashkin@ya.ru](mailto:vladimirivashkin@ya.ru)

*Aleksandr I. Burkov*, PhD, A/Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomol'skii Ave., 614990, Perm, Russia, [ale-burkov1@ya.ru](mailto:ale-burkov1@ya.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.

# ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

## BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 211–219.

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 (5): 211–219.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-211-219

EDN: RPYBGR

### К ВОПРОСУ О ПРИРОДНОЙ УПЛОТНЕННОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

**Сергей Гаврилович Колмогоров<sup>1</sup>, Петр Леонидович Клемяционок<sup>2</sup>,  
Светлана Сергеевна Колмогорова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу уплотненности глинистых грунтов. Глинистые грунты часто являются основанием зданий и сооружений. Но использование таких грунтов в качестве основания затруднено вследствие их специфических свойств, а именно зависимости строительных свойств грунта, особенно характера деформирования и прочности, от степени уплотненности. Степень уплотненности является одним из важнейших качеств глинистого грунта, определяющим во многом его поведение под нагрузкой.

**Актуальность.** Степень уплотненности может использоваться в качестве классификационного показателя, а также для предварительной оценки и прогнозирования поведения грунта в различных напряжено-деформированных условиях. Как известно, на уплотненность глинистых грунтов влияют различные факторы: глубина залегания, состав осадка и глин, среда и условия уплотненности.

**Целью** работы являлось уточнение классификации по уплотненности для глинистых грунтов с возможностью дальнейшего использования в практических целях.

**Результаты.** Выполнен анализ зависимости осредненных значений плотности сухого грунта от естественной влажности для некоторых генетических типов грунтов с использованием различных литературных источников (В.Д. Ломтадзе, В.М. Бевзюк., М.Ю. Абе-лев, М.П. Лысенко, В.М. Фурса, Е.И. Мишнаевская). В настоящей работе анализ позволил уточнить имеющуюся классификацию глинистых грунтов по уплотненности в зависимо-

сти от плотности сухого грунта  $\rho_d$ . Возможность получения зависимости  $\rho_d = f(W_e)$  позволяет также использовать ее для уточнения классификации, определяя границы  $W_e$ ,  $\rho_d$  для определенных генетических типов грунтов.

**Ключевые слова:** уплотненность, глинистый грунт, плотность сухого грунта, естественная влажность

**Для цитирования:** Колмогоров С.Г., Клемяционок П.Л., Колмогорова С.С. К вопросу о природной уплотненности глинистых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-211-219. EDN: RPYBGR

## ORIGINAL ARTICLE

### ON NATURAL COMPACTION OF CLAY SOILS

Sergey G. Kolmogorov<sup>1</sup>, Petr L. Klemyatsionok<sup>2</sup>,  
Svetlana S. Kolmogorova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** This article studies the compaction of clay soils. Clay soils are often used as building foundations. However, such a use is complicated by their specific properties, namely the dependence of structural properties, particularly deformation patterns and strength, on the compaction degree. Compaction is one of the most important properties of clay soil, largely determining its behavior under load. Compaction can be used as a classification indicator, as well as for preliminary assessment and prediction of the soil behavior under various stress-strain conditions. As is known, the compaction of clay soils is influenced by various factors: occurrence depth, sediment and clay composition, environment and compaction conditions.

**Purpose:** The aim of this work is to refine the compaction classification of clay soils with the possibility of using for practical purposes.

**Methodology:** The article analyzes the dependence of average density of dry soils on the natural moisture content in genetic soil types.

**Research findings:** The current classification of clay soils is refined, depending on the dry soil density. The obtained dry soil density dependence  $\rho_d = f(W_e)$  determines the boundaries of  $W_e$ ,  $\rho_d$  for certain genetic soil types.

**Keywords:** compaction, clay soil, dry soil density, moisture protection

**For citation:** Kolmogorov S.G., Klemyatsionok P.L., Kolmogorova S.S. On Natural Compaction of Clay Soils. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-211-219. EDN: RPYBGR

Длительное время использование природной уплотненности глин в строительных классификациях грунтов не привлекало должного внимания в связи с применением консистенции, с которой уплотненность тесно связана. Процесс природного уплотнения глин систематически рассмотрен в работе Н.Я. Денисова [5], где анализируются факторы, влияющие на уплотненность грунта: глубина залегания, состав осадка и глин, среда и условия уплотнения.

Развивая представления о нормально уплотненных, недоуплотненных и переуплотненных глинах, два последних состояния автор относит к энерге-

тически неустойчивым, способным к объемным деформациям (просадке или набуханию) при изменении условий среды. Денисовым обоснована необходимость понимания плотности как величины относительной, зависящей от условий образования и существования (диагенеза) породы.

К такому выводу по результатам проведенного им анализа с использованием показателей уплотненности приходит В.А. Приклонский [10].

И.М. Горькова уплотненность грунта, оцениваемую плотностью сухого грунта  $\rho_d$  и пористостью, включила в систему «прямых» показателей, используемых для оценки и прогноза строительных свойств грунтов, особенно характера деформирования и прочности [4]. Ее классификация и граничные значения плотности сухого грунта  $\rho_d$  и пористости  $n$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Классификация уплотненности глинистых грунтов  
по значению плотности сухого грунта  $\rho_d$  и пористости  $n$**

Table 1

**Classification of soil compaction by dry soil density and porosity**

| №<br>п/п | Грунты                    | $\rho_d$ , т/м <sup>3</sup> | $n$ , % |
|----------|---------------------------|-----------------------------|---------|
| 1        | Слабоуплотненные          | < 1,2                       | > 55    |
| 2        | Средней уплотненности (1) | 1,2–1,46                    | 55–38   |
| 3        | Средней уплотненности (1) | 1,46–1,65                   | 55–38   |
| 4        | Сильно уплотненные        | 1,65–2,0                    | 38–27   |
| 5        | Очень сильно уплотненные  | > 2,0                       | < 27    |

Для водонасыщенных в естественных условиях залегания ( $S_r > 0,8$ ) осадочных пород в [4] установлена общая зависимость  $\rho_d = f(W_e)$ , справедливая в широком диапазоне влажности (до 300 %). Приведен график установленной зависимости, которая рассматривается как «выражение общего закона уплотнения и обезвоживания осадочных пород в процессе литогенезиса» [4, с. 62]. Формулы зависимости не приведены, количественно она охарактеризована интенсивностью падения  $\rho_d$  при росте влажности на 1 % для нескольких интервалов  $\rho_d$  следующим образом:

$$\text{– для } \rho_d = 0,4\text{--}0,8 \quad \Delta\rho_d / \Delta W = 0,003;$$

$$\text{– для } \rho_d = 1,2\text{--}1,6 \quad \Delta\rho_d / \Delta W = 0,02;$$

$$\text{– для } \rho_d = 1,7\text{--}2,0 \quad \Delta\rho_d / \Delta W = 0,033.$$

В [4, с. 62] отмечается, что «это объясняет известный факт, что в илах и других высоковлажных породах уменьшение влажности на несколько процентов практически не оказывает влияния на их физические и механические свойства, тогда как в более плотных глинах подобное изменение влажности уже значительно сказывается на их прочности».

В анализе относящихся к глинистым грунтам закономерностей часто приходится пользоваться осредненными показателями. Представляет интерес выяснение возможности проверки установленной в [4] зависимости с применением осредненных значений  $W_e$ ,  $\rho_d$ , приведенных в различных литературных источниках.

Сводка таких данных, упорядоченных по возрастанию  $W_e$ , приведена в табл. 2. В отношении источников данных: большая их часть (22 из 31) приводится по сводке В.Д. Ломтадзе [7]. Данные по слабым морским послеледниковым глинам приводятся по работам В.М. Бевзюка [2, 3, 6]; по речным илам – по М.Ю. Абелеву [1]; по илам Черного моря – по обзорам в книге М.П. Лысенко [8]; для плотных глин – по В.М. Фурса [11], Е.И. Мишнаевской [9].

Таблица 2

**Осредненные значения естественной влажности  
и плотности сухого грунта для различных видов глинистых грунтов**

Table 2

**Average values of natural moisture and density of dry soil for different types  
of clay soils**

| №<br>п/п | Грунт                          | $W_e$ % | $\rho_d$ т/м <sup>3</sup> |
|----------|--------------------------------|---------|---------------------------|
| 1        | Морена московская              | 13      | 1,95                      |
| 2        | Глина верхнекарбоновая         | 13,3    | 2,04                      |
| 3        | Глина котлинская               | 13,6    | 1,94                      |
| 4        | Глина нижнекембрийская         | 14      | 1,90                      |
| 5        | Глина верхнедевонская          | 17      | 1,86                      |
| 6        | Морена валдайская              | 18      | 1,82                      |
| 7        | Аргиллиты татарского яруса     | 18      | 1,81                      |
| 8        | Аргиллиты казанского яруса     | 18      | 1,78                      |
| 9        | Глина верхнекарбоновая         | 19      | 1,72                      |
| 10       | Глина нижнекарбоновая          | 20      | 1,72                      |
| 11       | Глина татарского яруса         | 21      | 1,72                      |
| 12       | Глина меотическая              | 25      | 1,61                      |
| 13       | Глина нижнемеловая             | 28      | 1,52                      |
| 14       | Глина спондиловая              | 29      | 1,47                      |
| 15       | Глина нижнемеловая             | 31      | 1,47                      |
| 16       | Глина ленточная                | 33      | 1,44                      |
| 17       | Глина хвалынская               | 33      | 1,44                      |
| 18       | Глина верхнеюрская             | 33      | 1,41                      |
| 19       | Глина верхнемеловая            | 35      | 1,36                      |
| 20       | Глина палеоген                 | 35      | 1,33                      |
| 21       | Глина верхнеюрская             | 39      | 1,32                      |
| 22       | Глина ленточная, скрытотекучая | 41,3    | 1,28                      |

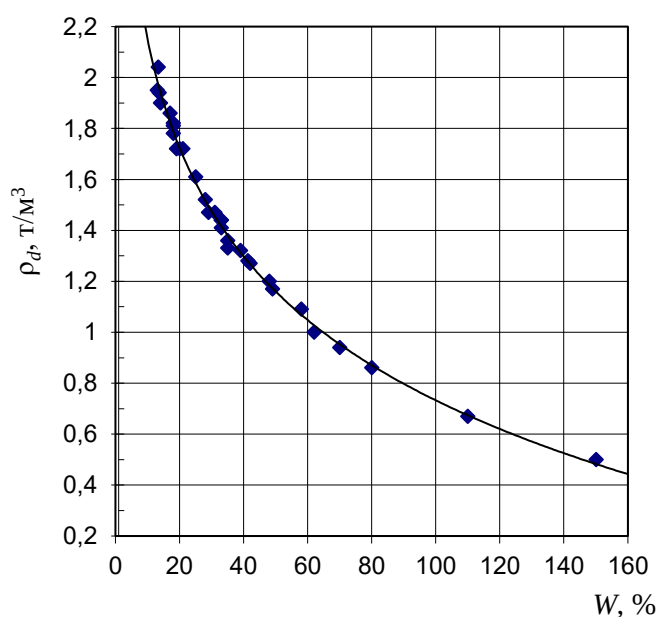


Окончание табл. 2

End of table 2

| №<br>п/п | Грунт                                 | $W_e$ % | $\rho_d$ т/м <sup>3</sup> |
|----------|---------------------------------------|---------|---------------------------|
| 23       | Глина майкопская                      | 42      | 1,27                      |
| 24       | Глина иольдиева                       | 48      | 1,20                      |
| 25       | Глина нежнесарматская                 | 49      | 1,17                      |
| 26       | Слабые морские глины                  | 58      | 1,09                      |
| 27       | Речные илы                            | 62      | 1,00                      |
| 28       | Иольдиевые глины, Карелия             | 70      | 0,94                      |
| 29       | Иольдиевые глины, Кольский полуостров | 80      | 0,86                      |
| 30       | Илы Черного моря                      | 110     | 0,67                      |
| 31       | Илы Черного моря                      | 150     | 0,55                      |

Расположение точек и построенный по ним график зависимости  $\rho_d = f(W_e)$  приведены на рис. 1. Можно предполагать, что в общем построенная зависимость близка к установленной в [4] для  $W_e < 150$  %. Проверить это можно, описав зависимость формулой.

Рис. 1. График зависимости  $\rho_d = f(W_e)$ Fig. 1.  $\rho_d = f(W_e)$  dependence

Такая зависимость непосредственно следует из данных рис. 2, на котором значения  $W_e$  отложены в логарифмическом масштабе. Прямая на рис. 2 проведена через две точки:

$W_1 = 10\%$ ;  $\lg W_1 = 1$ ;  $\rho_d = 2,16$ ;

$W_2 = 100\%$ ;  $\lg W_2 = 2$ ;  $\rho_d = 0,74$ .

Ее уравнение:

$$\rho_d = 3,58 - 1,42 \lg W_e. \quad (1)$$

Если влажность выражена в долях единицы, то

$$\rho_d = 0,74 - 1,42 \lg W_e. \quad (2)$$

Интенсивность (скорость) падения  $\rho_d$  с ростом влажности дается производной:

$$\rho_d' = \left| \frac{d\rho_d}{dW_e} \right| = \frac{0,62}{W_e}. \quad (3)$$

С использованием (3) для любой влажности можно рассчитать падение  $\rho_d$  на  $dW_e = 1\% = 0,01$  повышения влажности, сопоставив результаты с приведенными выше значениями по [4].

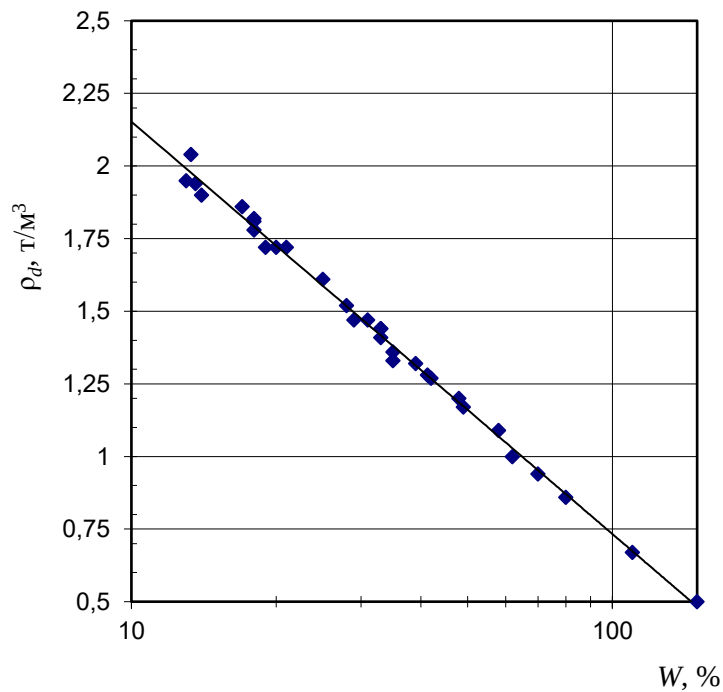


Рис. 2. График зависимости  $\rho_d = f(W_e)$

Fig. 2.  $\rho_d = f(W_e)$  dependence

Анализ значений  $W_e$ ,  $\rho_d$  по рис. 1 и табл. 2 показывает, что для пород, уплотненных сильно, соответствующие им влажности меняются в пределах 0,1–0,2; для пород средней уплотненности – 0,25–0,35; при  $W_e > 0,50$  породы слабоуплотненные. Для перечисленных и еще больших влажностей значения  $\rho_d'$  и падения  $d\rho_d = \rho_d' dW_e$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

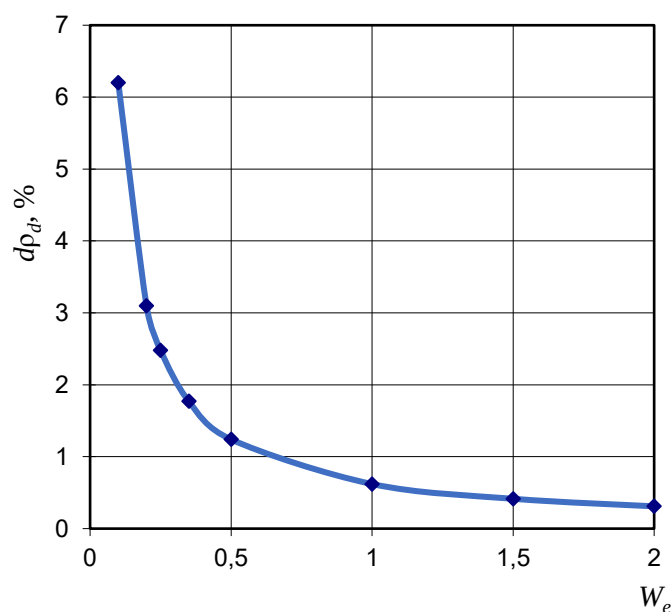
Значения  $\rho_d$  и  $d\rho_d = \rho_d' dW_e$  при разной влажности  $W_e$ 

Table 3

 $\rho_d$  and  $d\rho_d = \rho_d' dW_e$  values at different moisture  $W_e$ 

| $W_e$ | $ \rho_d' $ | $d\rho_d = \rho_d' dW_e$ |     | $W_e$ | $ \rho_d' $ | $d\rho_d = \rho_d' dW_e$ |     |
|-------|-------------|--------------------------|-----|-------|-------------|--------------------------|-----|
|       |             | д. е.                    | %   |       |             | д. е.                    | %   |
| 0,1   | 6,2         | 0,062                    | 6,2 | 0,5   | 1,24        | 0,012                    | 1,2 |
| 0,2   | 3,1         | 0,031                    | 3,1 | 1,0   | 0,62        | 0,006                    | 0,6 |
| 0,25  | 2,48        | 0,025                    | 2,5 | 1,5   | 0,415       | 0,004                    | 0,4 |
| 0,35  | 1,77        | 0,018                    | 1,8 | 2,0   | 0,31        | 0,003                    | 0,3 |

Зависимость  $\rho_d = f(W_e)$  приведена на рис. 3. Следует отметить, что значения  $d\rho_d$  при  $W_e = 0,2$  и  $0,35$  близки к указанным в [4]. Для слабоуплотненных пород  $d\rho_d$  превышают указанное в [4] значение  $0,003 = 0,3\%$ ; как следует из данных табл. 3 и графика на рис. 3, это значение соответствует влажности  $W_e = 200\%$ , выходящей за пределы рассматриваемого интервала.

Рис. 3. График зависимости  $d\rho_d = f(W_e)$ Fig. 3.  $d\rho_d = f(W_e)$  dependence

Намеченные выше значения влажности и соответствующие им значения плотности позволяют составить классификацию глин по уплотненности, приведенную ниже (табл. 4).

Таблица 4

## Классификация глинистых грунтов по уплотненности

Table 4

## Clay soil classification by compaction

| № п/п | Наименование глинистых грунтов по уплотненности | $\rho_d, \text{т/м}^3$ |
|-------|-------------------------------------------------|------------------------|
| 1     | Очень слабоуплотненные                          | $< 1,15$               |
| 2     | Слабоуплотненные                                | $1,15-1,35$            |
| 3     | Средней уплотненности                           | $1,35-1,60$            |
| 4     | Сильно уплотненные                              | $1,60-1,90$            |
| 5     | Очень сильно уплотненные                        | $> 1,90$               |

В заключение отметим, что сам факт получения зависимости  $\rho_d = f(W_e)$  на основании осредненных данных заставляет рассматривать ее как закономерность статистическую, предполагающую изменчивость индивидуальных значений. Это можно использовать для уточнения классификации, определяя границы  $W_e, \rho_d$  аналогично проведенному в настоящей работе анализу для определенных генетических типов грунтов.

Целесообразна также увязка результатов с классификациями по показателям уплотненности В.А. Приклонского и Н.Я. Денисова.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Абелев М.Ю.* Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. Москва : Стройиздат, 1973. 288 с.
2. *Бевзюк В.М.* Некоторые данные о взаимосвязи природной плотности и прочности мягких глин Карелии и Кольского полуострова // Механика грунтов : труды ЛИИЖТа. Ленинград, 1966. Вып. 250. С. 74–80.
3. *Бевзюк В.М.* Методы исследования прочностных свойств слабых глинистых грунтов как естественного основания железнодорожных насыпей (на примере отложений Кольского полуострова и Карелии) : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Ленинград : [б. и.], 1969. 25 с.
4. *Горькова И.М.* Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. Москва : Стройиздат, 1975. 151 с.
5. *Денисов Н.Я.* Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. 288 с.
6. *Дянин А.В., Бевзюк В.М.* Условия формирования инженерно-геологических особенностей слабых глинистых отложений морского генезиса // Надежность оснований транспортных сооружений : сборник научных трудов. Санкт-Петербург, 1998. С. 102–106.
7. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная петрология. 2-е изд. Ленинград : Недра, 1984. 511 с.
8. *Лысенко М.П.* Глинистые грунты Русской платформы. Москва : Недра, 1986. 252 с.
9. *Мишинаевская Е.И.* Влияние вещественного состава глинистых грунтов на их инженерно-геологические свойства : сб. тр. МИИТ. Вып. 264. Москва : Транспорт, 1969.
10. *Приклонский В.А.* Грунтоведение. Часть 1. 3-е изд. Москва : Госгеолтехиздат, 1955. 431 с.
11. *Фурса В.М.* Строительные свойства грунтов Ленинграда. Ленинград : Стройиздат, 1975. 142 с.

## REFERENCES

1. *Abelev M.Yu.* Weak Water-Saturated Clay Soils as Structure Foundations. Moscow: Stroiizdat, 1973. (In Russian)

2. Bevzyuk V.M. Some Data on the Relationship Between Natural Density and Strength of Soft Clays of Karelia and The Kola Peninsula. In: Coll. Papers "Soil Mechanics", Iss. 250. Leningrad: Nedra, 1966. Pp. 74–80. (In Russian)
3. Bevzyuk V.M. "Methods of studying strength properties of weak clay soils as a natural base for railway embankments (using sediments of the Kola Peninsula and Karelia as an example)". PhD Abstract. Leningrad, 1969. 25 p. (In Russian)
4. Gorkova I.M. Physicochemical Studies of Dispersed Sedimentary Rocks for Construction Purposes. Moscow: Stroyizdat, 1975. 151 p. (In Russian)
5. Denisov N.Ya. Construction Properties of Clay Rocks and Their Use in Hydraulic Engineering. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 288 p. (In Russian)
6. Dyanin A.V., Bevzyuk V.M. Conditions of Engineering-Geological Formation of Weak Clayey Deposits of Marine Genesis. In: Coll. Papers "Reliability of Transport Structure Foundations", Saint-Petersburg, 1998. Pp. 102–106 (In Russian)
7. Lomtadze V.D. Engineering Geology. Engineering Petrology. 2nd edn. Leningrad: Nedra, 1984. 511 p. (In Russian)
8. Lysenko M.P. Clayey Soils of the Russian Platform. Moscow: Nedra, 1986. 252 p. (In Russian)
9. Mishnaevskaya E.I. Influence of the Material Composition of Clay Soils on their Engineering-Geological Properties. In: MIIT Coll. Papers. Iss. 264. Moscow: Transport, 1969. (In Russian)
10. Priklonsky V.A. Soil Science. Part 1. 3rd edn. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1955. 431 p. (In Russian)
11. Fursa V.M. Construction Properties of Leningrad Soils. Leningrad: Stroyizdat, 1975. 142 p. (In Russian)

#### Сведения об авторах

*Колмогоров Сергей Гаврилович*, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, [Kolmogorovsg@list.ru](mailto:Kolmogorovsg@list.ru)

*Клемяцкионек Петр Леонидович*, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, [Petr.1940@list.ru](mailto:Petr.1940@list.ru)

*Колмогорова Светлана Сергеевна*, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, [Kolmogorovass@yandex.ru](mailto:Kolmogorovass@yandex.ru)

#### Authors Details

*Sergei G. Kolmogorov*, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State Agrarian University, 2, Peterburgskoe Road, 196601, Saint-Petersburg, Pushkin, Russia, [Kolmogorovsg@list.ru](mailto:Kolmogorovsg@list.ru)

*Petr L. Klemyatsionok*, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, [Petr.1940@list.ru](mailto:Petr.1940@list.ru)

*Svetlana S. Kolmogorova*, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia [Kolmogorovass@yandex.ru](mailto:Kolmogorovass@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 11.06.2025  
Одобрена после рецензирования 27.06.2025  
Принята к публикации 03.09.2025

Submitted for publication 11.06.2025  
Approved after review 27.06.2025  
Accepted for publication 03.09.2025

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 220–233.

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 (5): 220–233.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 674.02:533.924

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-220-233

EDN: RVVWRR

### СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ, ОБРАБОТАННОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ

Геннадий Георгиевич Волокитин<sup>1</sup>, Виктор Данилович Гольдин<sup>2</sup>,  
Владимир Алексеевич Черемных<sup>1</sup>, Николай Александрович Цветков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

**Аннотация.** Актуальность. Одним из ключевых критериев для применения древесины в строительстве является ее стойкость к воздействию неблагоприятных факторов. Чаще всего защиту древесины обеспечивают с помощью специальных пропиток или покрытий, однако их эффективность ограничена сроком службы и эксплуатационными условиями. В качестве альтернативного варианта предлагается рассмотреть обработку поверхности древесины низкотемпературной плазмой. Для расширения области применения и спектра обрабатываемой продукции необходимо установить возможность управления свойствами поверхности строительных изделий из древесины в процессе плазменной обработки. Для решения данной задачи требуется определить влияние параметров обработки на свойства поверхности древесины.

**Целью** работы является определение свойств поверхности строительных материалов из древесины сосны в зависимости от параметров плазменной обработки.

**Результаты.** По результатам теоретических расчетов установлено, что величина удельного теплового потока и скорость обработки влияют на глубину обработки строительных материалов из древесины, что может оказывать влияние на свойства поверхности. В результате экспериментальных исследований определено, что при повышении глубины обработки снижается водопроницаемость и повышается биостойкость древесины.

Так, при величине удельного теплового потока  $1,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и скорости обработки 12 см/с водопроницаемость образцов составляет  $(2,8 \pm 0,1)$  см<sup>3</sup>/ч, биостойкость – 4 балла, а при снижении скорости обработки (увеличении времени воздействия) до 3 см/с при прочих неизменных параметрах водопроницаемость равна  $(1,5 \pm 0,1)$  см<sup>3</sup>/ч, а биостойкость – 1 балл. Полученные результаты отражают возможность управления свойствами поверхности строительных изделий из древесины в процессе плазменной обработки.

**Ключевые слова:** древесина, плазменная обработка, термодеструкция, тепловой поток, глубина обработки, свойства древесины

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

**Для цитирования:** Волокитин Г.Г., Гольдин В.Д., Черемных В.А., Цветков Н.А. Свойства поверхности строительных материалов из древесины сосны, обработанной низкотемпературной плазмой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 220–233. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-220-233. EDN: RVVWRR

## ORIGINAL ARTICLE

### SURFACE PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS MADE OF PINE WOOD TREATED WITH LOW-TEMPERATURE PLASMA

Gennady G. Volokitin<sup>1</sup>, Victor D. Goldin<sup>2</sup>,  
Vladimir A. Cheremnykh<sup>1</sup>, Nikolay A. Tsvetkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

**Abstract. Relevance.** One of the key criteria for the use of wood in construction is its resistance to adverse factors. Most often, wood protection is provided using special impregnations or coatings, but their effectiveness is limited by their service life and operating conditions. As an alternative, it is proposed to consider the wood surface treatment with low-temperature plasma. In order to expand the scope and range of processed products, it is necessary to provide control for the surface properties of wood construction products in the plasma treatment process. To solve this problem, it is necessary to determine the effect of processing parameters on wood surface properties.

**Purpose:** The aim of the work is to determine the surface properties of pine wood construction materials depending on the parameters of plasma treatment.

**Research findings:** Based on the results of theoretical calculations, it is found that the specific heat flow and processing speed affect the processing depth of building materials made of wood, which can affect the surface properties. According to tests, water permeability decreases and bio-resistance of wood grows with increasing processing depth. Thus, with a specific heat flux of  $1.2 \cdot 10^6$  W/m<sup>2</sup> and processing speed of 12 cm/s, the water permeability of the samples is  $2.8 \pm 0.1$  cm<sup>3</sup>/h, bio-resistance is 4 points, while at the processing speed (longer exposure time) reduced to 3 cm/s other constant parameters being constant, the water permeability is  $1.5 \pm 0.1$  cm<sup>3</sup>/h, and the bio-resistance is 1 point.

**Value:** The results obtained reflect the possibility of control for surface properties of wood construction products during plasma treatment.

**Keywords:** wood, plasma treatment, thermal degradation, heat flow, processing depth, wood properties



**Funding:** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FEMN-2023-0003).

**For citation:** Volokitin G.G., Goldin V.D., Cheremnykh V.A., Tsvetkov N.A. Surface Properties of Building Materials made of Pine Wood Treated with Low-Temperature Plasma. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 220–233. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-220-233. EDN: RVVWRR

### Введение

На протяжении долгих лет древесина остается востребованным строительным материалом [1]. Наибольшим спросом пользуются строительные изделия из древесины хвойных пород. Прочность, сравнительно небольшая масса, экологичность, простота обработки, возобновляемость материала – факторы, определяющие популярность древесины в строительстве [2]. Важным параметром строительных изделий, в том числе и из древесины, является их долговечность. Древесина как органический материал склонна к изменению эксплуатационных свойств под действием неблагоприятных внешних факторов [3]. Поэтому с целью обеспечения долговечности строительных изделий из древесины необходимо предусмотреть их защиту от внешних факторов [4].

На практике для повышения стойкости древесины к неблагоприятным воздействиям применяются различные защитные пропиточные составы и лакокрасочные покрытия. В качестве одного из инновационных и перспективных методов защиты предлагается рассмотреть обработку потоком низкотемпературной плазмы. Благодаря такой обработке в приповерхностной области древесины формируется слой, отличающийся водоотталкивающими и биозащитными свойствами, при этом не влияющий на механические характеристики изделий [5].

Однако для внедрения данного метода защиты древесины необходимо предусмотреть возможность регулирования свойств конечных изделий, поскольку такая возможность позволит расширить область применения обработанных изделий.

Целью настоящей работы является определение свойств поверхности строительных материалов из древесины сосны в зависимости от параметров плазменной обработки.

### Материалы и методы

При термическом воздействии на древесину протекает ряд связанных друг с другом физико-химических процессов. Как правило, эти процессы представляют в виде нескольких стадий. На первой стадии происходит испарение легколетучих веществ, например воды. Следующая стадия – термохимическое разложение веществ, составляющих древесину, так называемый пиролиз. Пиролиз протекает с выделением газообразных продуктов и образованием углеродного остатка – коксика. На завершающем этапе происходит разложение коксика с образованием летучих соединений и минерального остатка – золы [6–8]. Результатом данных процессов является снижение плотности древесины и изменение ее теплофизических свойств.

Необходимо подчеркнуть, что пиролиз протекает преимущественно во внутренних слоях древесины, за счет ограниченного доступа кислорода, в то время как на поверхности древесины происходят окислительные процессы (горение) продуктов пиролиза, мигрирующих из внутренних слоев наружу за счет пористой структуры древесины. Все процессы сопровождаются эндотермическими и экзотермическими реакциями.

В работе [8] на основе термогравиметрических исследований разработана модель термического разложения древесины, подвергаемой воздействию высокотемпературного плазменного потока. В рамках этой модели сложные физико-химические процессы, происходящие при нагреве материала, сведены к четырем основным стадиям, каждая из которых характеризуется скоростью реакции, описываемой законом Аррениуса. Кинетические параметры для каждой стадии были определены экспериментально посредством анализа изменения массы твердого остатка при динамическом нагреве образцов в инертной атмосфере. При этом установлено, что полученные параметры остаются стабильными и не зависят от скорости нагрева в диапазоне 10–20 градусов в минуту.

При математическом моделировании термической обработки древесины рассматривается обтекание деревянной доски вертикальной струей плазмы; при этом ось струи параллельна поверхности обрабатываемой доски и перемещается с постоянной скоростью вдоль ее длины. Предполагается, что термодинамические параметры струи и поле температуры в древесине не меняются по ширине доски.

Для описания теплового поля внутри древесины используется математическая модель пористого реагирующего тела [9, 10], в которой температура определяется из уравнения

$$\rho_s c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + G_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_s, \quad (1)$$

где  $t$  – время, с;  $x, y$  – геометрические координаты, отсчитываемые вдоль и вглубь пластины, м;  $\rho_s, c_{eff}$  – плотность твердого каркаса древесины, кг/м<sup>3</sup>, и его удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $c_{pg}, G_g$  – средняя удельная теплоемкость газообразных продуктов разложения при постоянном давлении, Дж/(кг·К), и их удельный расход, кг/(м<sup>2</sup>·с) ( $G_g < 0$ );  $T$  – температура, К;  $\lambda_{eff}$  – эффективный коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);  $Q_s$  – суммарный тепловой эффект реакций разложения, Вт/м<sup>3</sup>.

Для вычисления плотности твердого материала используется модель термического разложения из работы [8], в которой рассматривается 4 стадии пиролиза, а твердый материал древесины представляет собой пятикомпонентную смесь:  $\rho_s = \sum_{i=1}^5 \rho_i$ . Плотность каждого компонента определяется из уравнений,

описывающих кинетику разложения на каждой стадии пиролиза. Значение  $G_g$  вычисляется из закона сохранения массы материала:

$$\frac{\partial G_g}{\partial y} = - \frac{\partial \rho_s}{\partial t}. \quad (2)$$

При вычислении теплового эффекта пиролиза приняты следующие допущения. Экзотермический эффект реакций не учитывается, т. к. он наблюдается при температурах, больших 593 К [6], что соответствует 4-й стадии разложения [8], где реакция идет медленно и не успевает проявиться при кратковременном температурном воздействии. Тепловой эффект первой стадии разложения при выделении легко испаряющихся компонентов древесины не учитывается в силу малой их концентрации в сухом материале. В результате в выражении для  $Q_s$  остаются только слагаемые, соответствующие второй и третьей стадиям разложения. В настоящей работе для теплового эффекта этих реакций принято  $Q = -370$  кДж/кг [6], и для вычисления суммарного теплового эффекта всех реакций используется формула

$$Q_s = Q[(1 - v_2)w_2 + (1 - v_3)w_3], \quad (3)$$

где  $w_2, w_3$  – скорости реакции разложения на 2-й и 3-й стадиях, вычисляемые по формуле Аррениуса [9];  $v_2, v_3$  – доли твердого остатка, образующегося на этих стадиях.

При решении уравнения (1) используются следующие начальные и граничные условия.

В начальный момент времени задается значение температуры  $T_0 = 293$  К, плотность древесины, доля летучих компонентов; плотность компонентов, образующихся при пиролизе, принимается равной 0.

Граничное условие на нагреваемой поверхности в общем случае имеет вид

$$q_{w(x,t)} - \varepsilon_w \sigma T_w^4 - G_{gw}(H_w - h_w) = -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (4)$$

где  $q_w(x, t)$  – тепловой поток от пограничного слоя;  $\varepsilon_w$  – излучательная способность поверхности (степень черноты);  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $H_w$  – значение удельной энтальпии внешнего газового потока на поверхности тела, Дж/кг;  $h_w$  – значение удельной энтальпии газообразных продуктов пиролиза, Дж/кг.

В отсутствии горения и при составе вдуваемых газов, близком к составу набегающего потока,  $H_w = h_w$  и соответствующий член в граничном условии исчезает. Однако если на поверхности происходит горение, то эта разность определяется кинетикой химических реакций, их тепловым эффектом, составом газов пиролиза, а также их диффузией в пограничный слой. В настоящей работе диффузия не учитывается, считается, что полное сгорание происходит на поверхности материала, тепловой эффект определяется из условий термодинамического равновесия. При этом предполагается, что продукты пиролиза состоят из углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), угарного газа ( $\text{CO}$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ). Для приведенных в [6, 7] диапазонов возможных концентраций продуктов пиролиза при разных температурах величина  $H_w - h_w$  может изменяться в 20 раз – от  $0,5 \cdot 10^7$  до  $10^8$  Дж/кг. Для получения более конкретных значений теплового эффекта требуется существенное усложнение модели. Для предварительных оценок термического режима древесины при обработке ее струей плазмы принято промежуточное значение  $H_w - h_w \approx -10^7$  Дж/кг.

Значения теплового потока  $q_w(x, t)$  зависят от этапа теплообмена материала с окружающей средой. На этапе взаимодействия струи плазмы с поверхностью используется формула

$$q_w = \left( \frac{\alpha}{c_p} \right)_e (H_e - H_w), \quad (5)$$

где  $H_e$  – удельная полная энтальпия струи, определяемая параметрами работы плазматрона и смешением струи с окружающим воздухом;  $(\alpha/c_p)_e$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . При этом для вычисления  $(\alpha/c_p)_e$  используется осредненная по ширине доски формула, полученная для случая продольного обтекания пластины турбулентным потоком воздуха [11]; удельная полная энтальпия струи определяется следующим образом:

$$H_e = H_0 + (H_{e0} - H_0) \exp \left[ -A \left( \frac{x - x_*}{\Delta} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где  $H_0$  – энтальпия окружающего воздуха;  $H_{e0}$  – энтальпия в центре струи, определяемая параметрами на выходе из сопла плазматрона;  $\Delta$  – радиус теплового воздействия струи на доску (полуширина теплового пятна);  $x_*$  – координата, соответствующая оси струи, которая перемещается вдоль доски со скоростью  $V$ :  $x_* = x_0 + Vt$ ,  $x_0$  – начальное значение  $x_*$ ;  $A = 3$ .

Вне теплового пятна струи

$$q_w = \alpha_0 (T_0 - T_w), \quad (7)$$

где  $T_0$  – температура внешней среды, совпадающая с начальной температурой материала;  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, который вычисляется по формуле, аппроксимирующей экспериментальные данные по естественно-конвективному охлаждению вертикально ориентированной поверхности [12].

В качестве граничных условий на левой и правой границах области при  $x = 0$  и  $x = L$  ( $L$  – длина доски), а также в глубине материала при  $y = h$  выставляются условия отсутствия теплообмена; в глубине материала используется условие  $G_y = 0$ .

Решение системы уравнений (1), (2) совместно с уравнениями кинетики термического разложения древесины осуществляется с помощью численных методов. Для решения уравнения (1) применяется неявная разностная схема, построенная на основе метода конечных объемов [12, 13], при этом члены, описывающие процессы теплопроводности, аппроксимируются со вторым порядком по пространственным переменным; для представления конвективного члена в левой части уравнения (1) используется противопоточная аппроксимация первого порядка. Уравнения кинетики разложения решаются неявным методом Эйлера первого порядка точности. Уравнение (2) интегрируется по формуле прямоугольников.

Получившаяся при применении этих методов нелинейная система алгебраических уравнений на каждом шаге по времени предварительно линеаризуется и решается методом итераций. При этом для решения двумерного разностного уравнения, соответствующего уравнению (1), используется метод переменных направлений со стабилизирующей поправкой Дугласа – Рекфорда [14].

Численные расчеты по предложенной математической модели проводились при следующих значениях исходных данных:

- эффективный коэффициент теплопроводности древесины  $\lambda_{eff} = 0,14 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;
- эффективная удельная теплоемкость материала  $c_{eff} = 1500 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;
- начальная плотность материала  $\rho_{s0} = 670 \text{ кг/м}^3$ ;
- начальная массовая доля летучих компонентов 0,05;
- излучательная способность поверхности материала  $\varepsilon_w = 0,8$ ;
- радиус теплового контакта струи плазмы с древесиной (полуширина струи)  $\Delta = 0,005 \text{ м}$ ;
- глубина, до которой ведется расчет, 0,005 м.

Мощность плазмотрона менялась в диапазоне 15–58,8 кВт; коэффициент полезного действия плазмотрона 0,6; скорость перемещения струи вдоль доски (V) изменялась в диапазоне 0,03–0,12 м/с.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из древесины сосны влажностью 12 %.

Обработка образцов потоком низкотемпературной плазмы выполнялась на оригинальном стенде, разработанном в Томском государственном архитектурно-строительном университете [15].

Исследования по влиянию плазменной обработки на водопроницаемость древесины проводились согласно ГОСТ Р 70748–2023 «Конструкции деревянные. Методы определения водопроницаемости защитных покрытий в натурных условиях».

Влияние параметров обработки на биостойкость древесины сосны оценивалось по интенсивности развития плесневелых грибов, в соответствии с ГОСТ 9.050–2021, по методу № 1. Подробное описание метода представлено в работе [16].

### Результаты

На рис. 1–3 приведены результаты расчетов при величине удельного теплового потока  $7,8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$  и скорости перемещения 0,06 м/с.

Как видно из рисунков, температура поверхности на фиксированном участке достигает максимального значения при прохождении струи, а затем медленно убывает вследствие охлаждения путем естественной конвекции. При этом разложение дерева продолжается и после прохождения струи (рис. 2).

Глубина и этапы термического разложения иллюстрируются на рис. 3 (нумерация компонентов материала взята из работы [8]). Появление 3-го компонента на глубине  $\Delta_2$  означает начало разложения твердого каркаса. Исчезновение его на глубине  $\Delta_1$  означает окончание быстрых этапов пиролиза. Сопоставление расчетов с результатами микроскопического анализа позволяет сделать вывод, что  $\Delta_1$  соответствует глубине обугливания древесины.

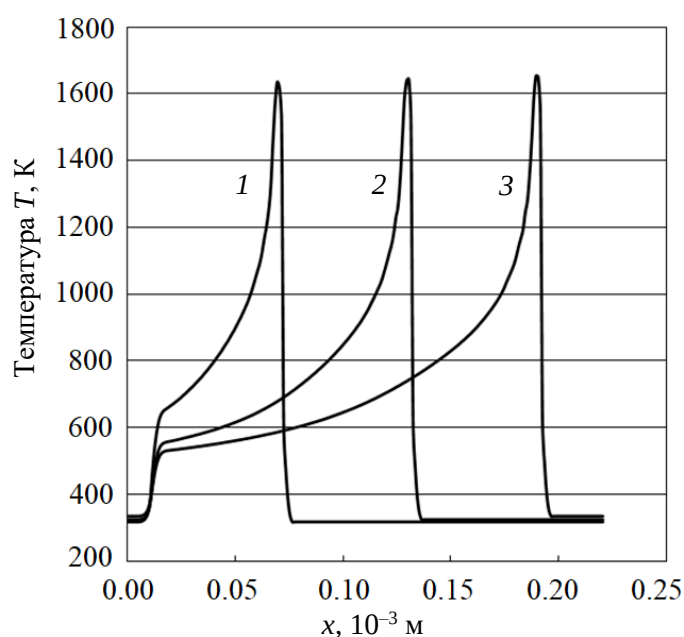


Рис. 1. Температура поверхности материала:

1 – в момент времени 1 с; 2 – в момент времени 2 с; 3 – в момент времени 3 с

Fig. 1. Material surface temperature:

1 – at time point of 1 s; 2 – at time point of 2 s; 3 – at time point of 3 s

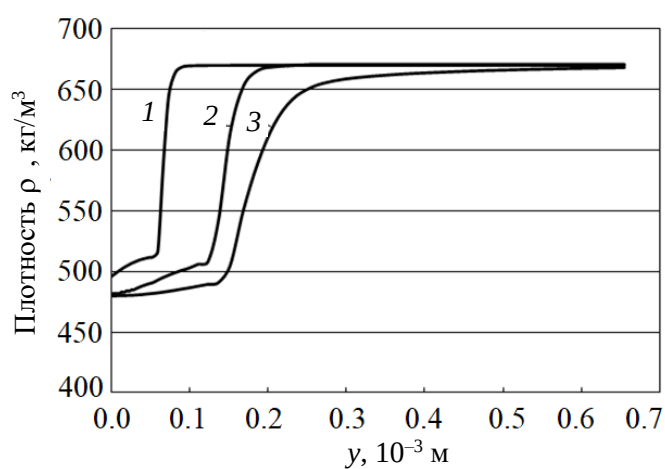


Рис. 2. Распределение плотности материала по глубине в момент времени  $t = 3$  с:

1 – в окрестности максимального теплового потока; 2 – после прохождения струи на расстоянии 1 см от области максимального нагрева; 3 – после прохождения струи на расстоянии 10 см от области максимального нагрева

Fig. 2. Density distribution over depth at  $t = 3$  s:

1 – near the maximum heat flow; 2 – after plasma jet flow at 1 cm distance from the area of maximum heating; 3 – after plasma jet flow at 10 cm distance from the area of maximum heating

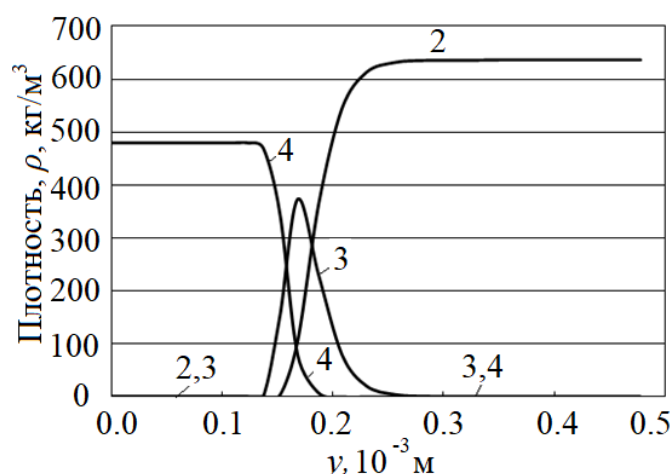


Рис. 3. Распределения плотности компонента разложения после окончания прохождения плазменной струи:

2 – материал исходного твердого каркаса (компонента № 2); 3, 4 – компоненты, возникающие на 2-й и 3-й стадиях разложения

Fig. 3. Density distribution of decomposition components after plasma jet passing:

2 – initial solid frame material (component 2); 3, 4 – components appearing at the 2nd and 3rd stages of decomposition

Суммарные результаты расчетов для различных параметров плазменной обработки приведены в табл. 1. Результаты теоретического расчета показывают, что как изменение величины удельного теплового потока, так и скорость обработки позволяют регулировать глубину обработанного слоя древесины. При этом глубина термического разложения увеличивается с повышением удельного теплового потока. Увеличение скорости продольного перемещения струи ее снижает, поскольку при неизменной величине удельного теплового потока уменьшается время теплового воздействия на конкретный участок поверхности.

Таблица 1

**Результаты расчетов термической обработки деревянной пластины  
потоком плазмы**

Table 1

**Calculation results of plasma treatment of wooden plate**

| $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | $V$ , см/с | $H_e$ , Дж/кг    | $t_k$ , с | $T_{w \text{ ср}}$ , К | $\Delta_1$ , мм | $\Delta_2$ , мм |
|--------------------------------|------------|------------------|-----------|------------------------|-----------------|-----------------|
| $0,46 \cdot 10^6$              | 3          | $3,5 \cdot 10^6$ | 6         | 490                    | 0,0             | 0,05            |
| $0,78 \cdot 10^6$              | 3          | $5,6 \cdot 10^6$ | 6         | 1015                   | 0,31            | 0,59            |
| $1,2 \cdot 10^6$               | 3          | $8,2 \cdot 10^6$ | 6         | 1235                   | 0,39            | 0,99            |
| $0,46 \cdot 10^6$              | 6          | $3,5 \cdot 10^6$ | 3         | 430                    | 0,0             | 0,0             |
| $0,78 \cdot 10^6$              | 6          | $5,6 \cdot 10^6$ | 3         | 820                    | 0,15            | 0,28            |
| $1,2 \cdot 10^6$               | 6          | $8,2 \cdot 10^6$ | 3         | 1085                   | 0,23            | 0,48            |
| $0,46 \cdot 10^6$              | 9          | $3,5 \cdot 10^6$ | 3         | 410                    | 0,0             | 0,0             |



Окончание табл. 1

End of table 1

| $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | $V$ , см/с | $H_e$ , Дж/кг    | $t_k$ , с | $T_{w\text{ ср}}$ , К | $\Delta_1$ , мм | $\Delta_2$ , мм |
|--------------------------------|------------|------------------|-----------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| $0,78 \cdot 10^6$              | 9          | $5,6 \cdot 10^6$ | 3         | 490                   | 0,0             | 0,02            |
| $1,2 \cdot 10^6$               | 9          | $8,2 \cdot 10^6$ | 3         | 970                   | 0,15            | 0,28            |
| $0,78 \cdot 10^6$              | 12         | $5,6 \cdot 10^6$ | 2,5       | 460                   | 0,0             | 0,0             |
| $1,2 \cdot 10^6$               | 12         | $8,2 \cdot 10^6$ | 2,5       | 870                   | 0,11            | 0,21            |

*Примечание.* В таблице:  $q_{\max}$  – максимальное значение теплового потока при начале нагрева (без учета горения газов), Вт/м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость перемещения струи вдоль доски, см/с;  $H_e$  – полная удельная энтальпия струи, Дж/кг;  $t_k$  – время, до которого велся расчет, с;  $T_{w\text{ ср}}$  – средняя температура точки поверхности за время прохождения теплового пятна, К;  $\Delta_1$  – глубина, на которой заканчивается быстрый этап пиролиза (в модели пиролиза исчезает компонент № 3, и твердый каркас древесины состоит только из компонентов № 4 и № 5), мм;  $\Delta_2$  – глубина, на которой начинается разложение твердого каркаса древесины (появляется компонент № 3 – результат разложения исходного материала каркаса), мм.

Зная зависимость глубины обработанного слоя от параметров обработки, необходимо экспериментально определить влияние этой глубины на свойства поверхности древесины.

В табл. 2 представлены результаты определения влияния параметров плазменной обработки на водопроницаемость образцов из сосны. Результаты анализа полученных данных представлены на рис. 4.

Таблица 2

## Водопроницаемость образцов из сосны

Table 2

## Water permeability of pine samples

| Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$v$ , см/с | Водопроницаемость<br>$V$ , см <sup>3</sup> /ч |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| –                                                         | –                                | $3,8 \pm 0,1$                                 |
| $0,46 \cdot 10^6$                                         | 3                                | $2,2 \pm 0,1$                                 |
| $0,78 \cdot 10^6$                                         | 3                                | $1,7 \pm 0,1$                                 |
| $1,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | $1,5 \pm 0,1$                                 |
| $0,46 \cdot 10^6$                                         | 6                                | $2,7 \pm 0,1$                                 |
| $0,78 \cdot 10^6$                                         | 6                                | $2,3 \pm 0,1$                                 |
| $1,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | $2,0 \pm 0,1$                                 |
| $0,46 \cdot 10^6$                                         | 9                                | $3,3 \pm 0,1$                                 |
| $0,78 \cdot 10^6$                                         | 9                                | $2,9 \pm 0,1$                                 |
| $1,2 \cdot 10^6$                                          | 9                                | $2,6 \pm 0,1$                                 |
| $0,78 \cdot 10^6$                                         | 12                               | $3,2 \pm 0,1$                                 |
| $1,2 \cdot 10^6$                                          | 12                               | $2,8 \pm 0,1$                                 |

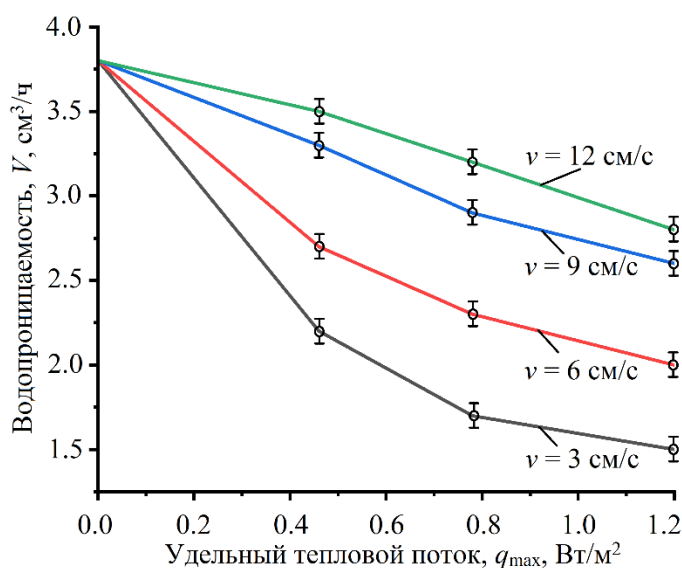


Рис. 4. Графики зависимости водопроницаемости образцов из сосны от величины удельного теплового потока и скорости обработки

Fig. 4. Dependences of water permeability of pine samples on specific heat flow and processing rate

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлено, что при повышении величины удельного теплового потока и/или уменьшении скорости обработки поверхности древесины снижается водопроницаемость обработанной древесины. Например, при величине удельного теплового потока  $0,46 \cdot 10^6$  Вт/м² и скорости обработки 3 см/с водопроницаемость равна  $(2,2 \pm 0,1)$  см³/ч, а при увеличении теплового потока до  $0,78 \cdot 10^6$  Вт/м² при неизменной скорости водопроницаемость составляет  $(1,7 \pm 0,1)$  см³/ч. Такой эффект связан с увеличением глубины обработанного слоя древесины.

На рис. 5 представлены кривые зависимости интенсивности развития грибков от параметров плазменной обработки. Установлено, что при повышении удельного теплового потока и/или снижении скорости обработки интенсивность развития грибков снижается. Так, при величине удельного теплового потока  $0,46 \cdot 10^6$  Вт/м² и скорости обработки 3 см/с биостойкость образцов оценивается в 3 балла, а при увеличении теплового потока до  $0,78 \cdot 10^6$  Вт/м² при неизменной скорости биостойкость равна 2 баллам. Это связано с тем, что снижается количество питательных для микроорганизмов веществ. Поэтому, чем больше глубина обработки, которая зависит от величины удельного потока и скорости, тем менее пригодна поверхность древесины для развития микроорганизмов.

Установлено, что параметры обработки оказывают влияние на глубину обработанного слоя древесины. В свою очередь, глубина этого слоя влияет на свойства поверхности древесины сосны. Таким образом, имея теоретические данные и экспериментальные данные влияния параметров обработки на глубину и свойства этого слоя, возможно проводить целенаправленную плазмен-

ную обработку древесины с целью формирования заданных характеристик, отвечающих специфическим требованиям потребителя.

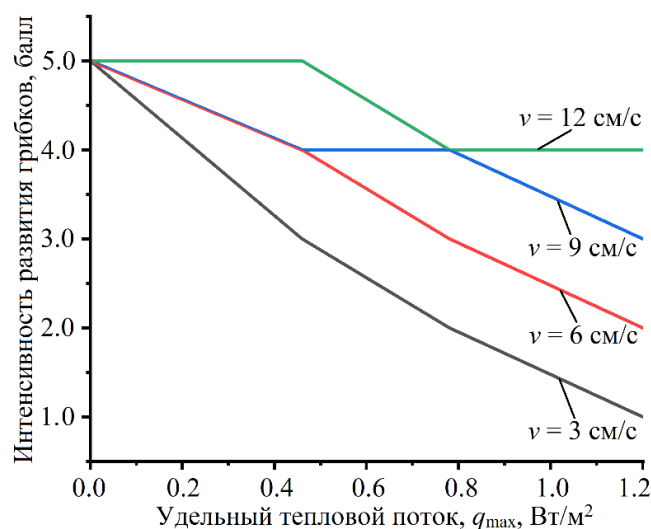


Рис. 5. Графики зависимости интенсивности развития грибка на образцах из сосны от величины удельного теплового потока и скорости обработки

Fig. 5. Dependences of fungal development on pine samples on specific heat flow and processing rate

Полученные данные имеют перспективу апробации на других смолосодержащих (хвойных) породах древесины (например, лиственница, кедр, ель и т. п.).

### Заключение

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных установлено следующее:

- параметры плазменной обработки влияют на глубину модифицированного слоя древесины;
- свойства древесины, рассматриваемые в настоящей работе – водопроницаемость и биостойкость – зависят от глубины модифицированного слоя древесины, определяющейся параметрами обработки;
- установив зависимости различных физико-химических и эксплуатационных свойств древесины от параметров обработки, возможно регулировать свойства обработанных строительных изделий из древесины.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 351 с.
2. Федосов С.В., Котлов В.Г., Окишев Н.И. Перспективы развития многоэтажных деревянных зданий // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2020. № 1 (67). С. 158–166. DOI 10.35803/1694-5298.2020.1.158-166
3. Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А., Донских Т.С. Защита древесины от влаги и гниения // Воронежский научно-технический вестник. 2014. Т. 3. № 4 (10). С. 68–73.

4. Девятникова Л.А., Симонова А.А. Влияние условий эксплуатации на разрушение конструкций жилых домов из древесины // *Resources and Technology*. 2020. Т. 17. № 3. С. 36–49. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5242
5. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Синицын В.А., Волокитин О.Г. и др. Плазменная обработка древесины // *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. Т. 23. № 1. С. 125–130.
6. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1992. 408 с.
7. *Пиролиз древесины* // Большая российская энциклопедия : [сайт]. URL: <https://bigenc.ru/c/piroliz-drevesiny-db4847> (дата обращения: 23.05.2025).
8. Черемных В.А., Волокитин Г.Г., Гольдин В.Д., Басалаев С.А. и др. О математической модели взаимодействия высокотемпературного потока плазмы с поверхностью древесины // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2024. № 88. С. 138–148. DOI: 10.17223/19988621/88/11
9. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. Москва : Энергия, 1976. 391 с.
10. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск : Наука, 1985. 318 с.
11. Лунев В.В. Течения реальных газов с большими скоростями. Москва : Физматлит, 2007. 760 с.
12. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва : Наука, 1971. 552 с.
13. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
14. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва : Энергия, 1977. 344 с.
15. Патент № 212821 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2021139632 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 10.08.2022 / Волокитин Г.Г., Шеховцов В.В., Безухов К.А., Черемных В.А. ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет». EDN: IAUZGY
16. Волокитин Г.Г., Черемных В.А., Адам А.М., Саркисов Ю.С. Повышение биостойкости строительных изделий из древесины сосны путем обработки потоком низкотемпературной плазмы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2025. Т. 27. № 1. С. 172–179. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179

## REFERENCES

1. Ugolev B.N. Wood Science and Forest Commodity Sciences. Moscow, 2007. 351p. (In Russian)
2. Fedosov S.V., Kotlov V.G., Okishev N.I. Development Prospects of Multi-Storey Wooden Buildings. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*. 2020; 1 (67): 158–166. DOI: 10.35803/1694-5298.2020.1.158-166 (In Russian)
3. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A., Donskikh T.S. Wood Protection from Moisture and Rot. *Voronezh Voronezhskii nauchno-tekhnicheskii vestnik*. 2014; 4 (10): 68–73. (In Russian)
4. Devyatnikova L.A., Simonova A.A. Influence of Operating Conditions on the Destruction of Residential Wooded Structures. *Resources and Technology*. 2020; 17 (3): 36–49. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5242. (In Russian)
5. Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Sinitsyn V.A., Volokitin O.G., et al. Plasma Treatment of Wood. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2016; 23 (1): 125–130. (In Russian)
6. Grishin A.M. Mathematical Modeling of Forest Fires and New Ways Protection. Novosibirsk: Nauka, 1992. 408 p. (In Russian)
7. Pyrolysis of wood. Great Russian Encyclopedia. Available: <https://bigenc.ru/c/piroliz-drevesiny-db4847>. (accessed May 23, 2025). (In Russian)
8. Cheremnykh V.A., Volokitin G.G., Goldin V.D., Basalaev S.A., et al. On a Mathematical Model of Interaction of a High-Temperature Plasma Flow with a Wood Surface. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*. 2024; (88): 138–148. DOI: 10.17223/19988621/88/11 (In Russian)
9. Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. Thermal Protection. Moscow: Energiya, 1976. (In Russian)
10. Grishin A.M., Fomin V.M. Conjugate and Nonstationary Problems of Reacting Media Mechanics. Novosibirsk: Nauka, 1985. (In Russian)

11. Lunev V.V. Flows of Real Gases at High Velocities. Moscow: Fizmatlit, 2007. 760 p. (In Russian)
12. Samarskiy A.A. Introduction to Difference Scheme Theory. Moscow: Nauka, 1971. 552 p. (In Russian).
13. Samarskiy A.A., Vabishevich P.N. Computational Heat Transfer. Moscow: Editorial URSS, 2003. 784 p. (In Russian)
14. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of Heat Transfer. Moscow: Energiya, 1977. 344 p. (In Russian)
15. Volokitin G.G., Shekhovtsov V.V., Bezukhov K.A., Cheremnykh V.A. "Device for Surface Treatment of Wood Products with Low-Temperature Plasma". UMP Rus. Fed. No. 212821 U1. 2022. (In Russian)
16. Volokitin G.G., Cheremnykh V.A., Adam A.M., Sarkisov Yu.S. Improvement of Biological Resistance of Pine Wood Building Products using Low-Temperature Plasma. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (1): 172–179. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179 (In Russian)

#### Сведения об авторах

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vgg-tomsk@mail.ru

Гольдин Виктор Данилович, канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, vdg@math.tsu.ru

Черемных Владимир Алексеевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vacheremnykh@gmail.com

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

#### Authors Details

Gennady G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vgg-tomsk@mail.ru

Victor D. Goldin, PhD, Senior Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, vdg@math.tsu.ru.

Vladimir A. Cheremnykh, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vacheremnykh@gmail.com

Nikolai A. Tsvetkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nac.tsuab@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 08.08.2025  
Одобрена после рецензирования 19.08.2025  
Принята к публикации 10.09.2025

Submitted for publication 08.08.2025  
Approved after review 19.08.2025  
Accepted for publication 10.09.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 234–246.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2025; 27 (5): 234–246.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

#### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.54

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-234-246

EDN: SLYJRM

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК, СНИЖАЮЩИХ СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРАСТВОРИМОГО ХРОМА ( $\text{Cr}^{6+}$ ) В ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЕ ДЛЯ ХРИЗОТИЛЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Александр Александрович Крутилин<sup>1</sup>,

Татьяна Владимировна Крапчетова<sup>2</sup>,

Надежда Александровна Инькова<sup>1</sup>, Олеся Константиновна Пахомова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Себряковский филиал Волгоградского государственного  
технического университета, г. Михайловка, Россия

<sup>2</sup>АО «Себряковцемент», г. Михайловка, Россия

**Аннотация.** Актуальность. В мировой практике последних десятилетий отмечается ужесточение требований к качеству строительных материалов, особенно к их экологической безопасности. Для цемента и цементных композиций эта проблема связана со снижением в них содержания хрома, который относится ко второму классу опасности – высоко опасные соединения. С экологической точки зрения наибольшую опасность представляет шестивалентный хром  $\text{Cr}(\text{VI})$ , особенно водорастворимый, являющийся по своей химической природе канцерогенным продуктом, вызывающим нарушение работы иммунной системы.

**Цель.** Подобрать дозировку дехроматора в весовом количестве (г/т цемента), снижающую содержание водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) в портландцементе, применяемом для хризотилцементных изделий, до нормируемого значения не более 0,0002 %. Провести сравнительный анализ добавок двух разных компаний.

**Испытания.** На первом этапе лабораторных испытаний был произведен совместный помол портландцементного клинкера и добавок в лабораторной мельнице-ступке RetschRM200. Вторым этапом лабораторных испытаний был произведен совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавок в лабораторной барабанной мельнице МБЛ.

**Выводы.** В результате испытаний добавок дехроматоров, предложенных компаниями ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» и MC-Bauchemie, положительное действие, направленное на снижение концентрации водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) в портландцементе, применяемом при производстве хризотилцементных изделий, показали образцы обеих компаний.

**Ключевые слова:** клинкер, портландцемент, водорастворимый хром, дехромат, помол, добавки, дозировка, исходный материал, лабораторные испытания

**Для цитирования:** Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Исследование влияния добавок, снижающих содержание водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) в портландцементе для хризотилцементных изделий // Вестник Том-

ского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 234–246. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-234-246. EDN: SLYJRM

## ORIGINAL ARTICLE

**EFFECT OF ADDITIVES REDUCING WATER-SOLUBLE CHROMIUM (Cr<sup>6+</sup>) CONTENT IN PORTLAND CEMENT FOR CHRYSOTILE CEMENT PRODUCTS**

**Aleksandr A. Krutilin<sup>1</sup>, Tatiana V. Krapchetova<sup>2</sup>,  
Nadezhda A. Inkova<sup>1</sup>, Olesya K. Pakhomova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Sebryakovsk Branch of Volgograd State Technical University,  
Mikhailovka, Russia*

<sup>2</sup>*AO "Sebryakovtsement", Mikhailovka, Russia*

**Abstract.** In recent decades, global practice has tightened requirements for the quality of building materials, and especially for their environmental safety. For cement and cement compositions, this problem is associated with a decrease in the chromium content, which belongs to highly hazardous compounds. From the environmental point of view, the greatest danger is hexavalent chromium Cr(VI), especially water-soluble, which is a carcinogenic product by its chemical nature, causing disruption of the immune system.

**Purpose:** The aim is to select a dechromator dosage in the weight, reducing the content of water-soluble chromium (Cr<sup>6+</sup>) in Portland cement used for chrysotile cement products to a standardized value not over 0.0002% and compare additives from two different companies.

**Methodology:** At the first stage of laboratory tests, Portland cement clinker and additives are ground together in a Retsch RM200 laboratory mortar mill. The second stage involves joint grinding of Portland cement clinker, gypsum and additives in a laboratory drum mill MBL.

**Research findings:** Additives of dechromators are proposed by companies ООО "Sintez OKA-Stroitel'naya Khimiya" and MC-Bauchemie. The samples of both companies show a positive effect on the concentration decrease of water-soluble chromium (Cr<sup>6+</sup>) in Portland cement used in the production of chrysotile cement products.

**Keywords:** clinker, Portland cement, water-soluble chromium, dechromate, grinding, additive, dosage, source material, laboratory tests

**For citation:** Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K. Effect of Additives Reducing Water-Soluble Chromium (Cr<sup>6+</sup>) Content in Portland Cement for Chrysotile Cement Products. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 234–246. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-234-246. EDN: SLYJRM

Характерной чертой мировой практики последних десятилетий становится ужесточение требований к качеству строительных материалов и особенно к их экологической безопасности. Для цемента и цементных композиций эта проблема связана со снижением в нем содержания хрома, который относится ко второму классу опасности – высоко опасные соединения [1, 2, 3]. С экологической точки зрения наибольшую опасность представляет шестивалентный хром Cr (VI), особенно водорастворимый, являющийся по своей химической природе канцерогенным продуктом, вызывающим нарушение работы иммунной системы [4, 5, 6]. Согласно директиве Европейского союза (ЕС) 2003/53/ЕС запрещено поставлять на рынок стран ЕС и использовать цементы



и цементные композиции, в которых концентрация водорастворимого Cr (VI) более 0,0002 % (2 мг на 1 кг цемента).

Цель настоящего исследования – снижение содержания водорастворимого шестивалентного хрома в цементах и цементных композициях, производимых на предприятиях по выпуску портландцемента [7, 8, 9].

Исходные материалы: клинкер портландцементный, полученный в печи сухого способа производства Ø 4,34×54 м [10].

Клинкер, производимый для выпуска портландцемента для хризотилцементных изделий, должен соответствовать требованиям ГОСТ 34902–2022 [11]. Согласно требованиям для испытаний был взят клинкер с химическими и физико-механическими показателями, не превышающими указанных норм. Химический состав клинкера определялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 TIGER. Массовая доля закисного железа FeO определялась согласно ГОСТ 5382–2019 перманганатным методом окислительно-восстановительного титрования. Данные анализов приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Химические показатели клинкера для хризотилцементных изделий

Table 1

## Chemical properties of clinker for chrysotile cement products

| п.п.п. <sup>1</sup> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | FeO  |
|---------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------|
| 0,95                | 21,87            | 4,33                           | 4,65                           | 66,36 | 1,46 | 0,54            | 0,04 |

Минералогический состав клинкера определялся рентгенофазовым анализом на дифрактометре D8 ENDEAVOR [12, 13, 14]. Результат съемки представлен на дифрактограмме (рис. 1).

Для определения пригодности данного клинкера для выпуска портландцемента для хризотилцементных изделий был произведен анализ определения содержания массовой доли водорастворимого хрома (Cr<sup>6+</sup>) по ГОСТ 5382–2019 фотокolorиметрическим методом [15]. Колебания по содержанию массовой доли водорастворимого хрома (Cr<sup>6+</sup>) по партиям составили от 0,0007 до 0,0014 %, что превышает допустимое значение не более 0,0002 %.

1. Дехроматор компании MC-Bauchemie: образец LP 2911-21.

2. Дехроматор компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия»: образец SintelX 100, образец SintelX 200.

Цель испытаний:

1. Подобрать дозировку дехроматора в весовом количестве (г/т цемента), снижающую содержание водорастворимого хрома (Cr<sup>6+</sup>) в портландцементе, применяемом для хризотилцементных изделий, до нормируемого значения не более 0,0002 % [16, 17].

2. Провести сравнительный анализ добавок двух разных компаний.

<sup>1</sup> Потери при прокаливании.

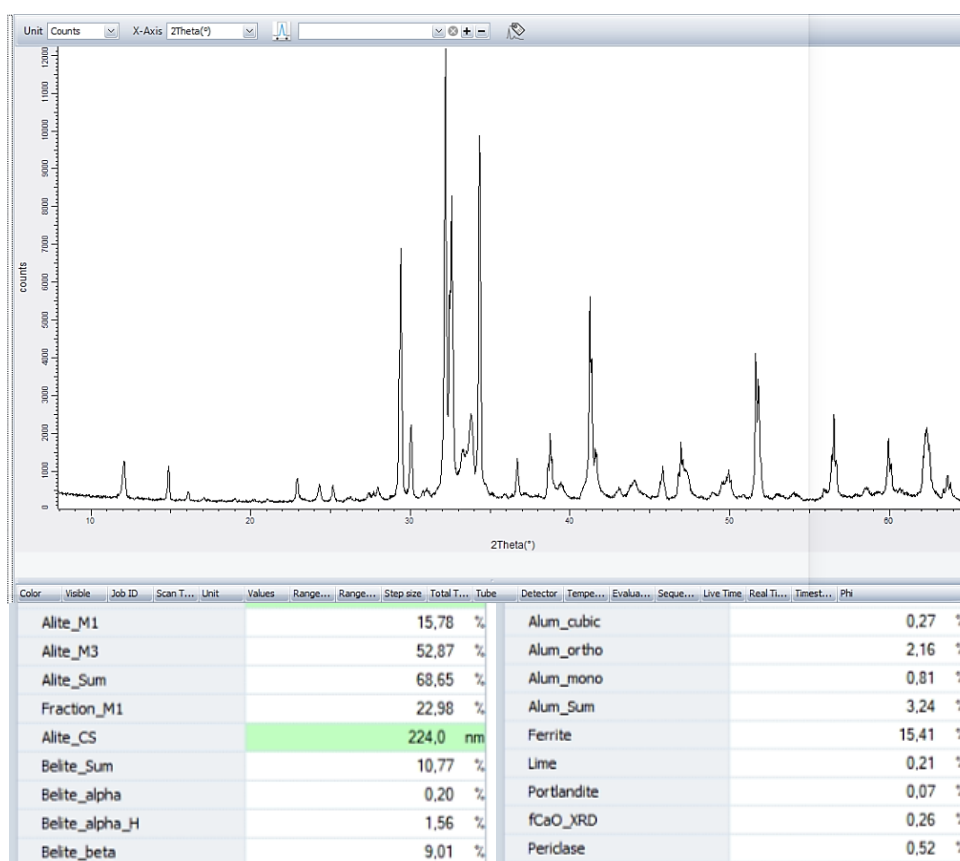


Рис. 1. Минералогический состав клинкера  
Fig. 1. Mineralogical composition of clinker

### Проведение испытаний

**Этап 1.** На первом этапе испытывался образец LP 2911-21 добавки дехроматора компании MC-Bauchemie.

Совместный помол портландцементного клинкера и добавок был произведен в лабораторной мельнице-ступке RetschRM200 [18]. Общая загрузка анализируемых проб составляла 100 г. Результаты испытаний отдельно по каждой подбираемой дозировке приведены в табл. 2.

Дехроматор компании MC-Bauchemie (образец LP 2911-21) представляет собой жидкую композицию белого цвета. Для испытаний, представленных в табл. 1, использовался концентрат без дополнительного разведения. Из полученных данных следует, что снижение концентрации водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) с 0,0007 до 0,0002 % наблюдается при вводе дехроматора из расчета 240 г/т цемента. Стойкое действие добавки сохранялось в течение 17 сут. На 25–50-е сут заметно небольшое увеличение концентрации ионов хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) до 0,0003 %.

Дозировка дехроматора в меньшем количестве (120 г/т цемента) планируемого снижения концентрации до нормируемого значения не более 0,0002 % не показала.

Таблица 2

**Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie  
в количестве 120 и 240 г/т цемента**

Table 2

**Results of testing MC-Bauchemie dechromator (concentrate) containing  
120 and 240 g/t of cement**

| Сроки проведения анализа  | Значение $\text{Cr}^{6+}$ , % |                 |                 |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
|                           | Клинкер без добавки           | 120 г/т цемента | 240 г/т цемента |
| Сразу после ввода добавки | 0,0007                        | 0,0004          | 0,0001          |
| Через 1 сут               | —                             | 0,0005          | 0,0002          |
| Через 4 сут               | —                             | 0,0005          | 0,0002          |
| Через 17 сут              | —                             | 0,0004          | 0,0002          |
| Через 25 сут              | —                             | 0,0005          | 0,0003          |
| Через 50 сут              | —                             | 0,0005          | 0,0003          |

Динамика поведения добавки с течением времени представлена на рис. 2.

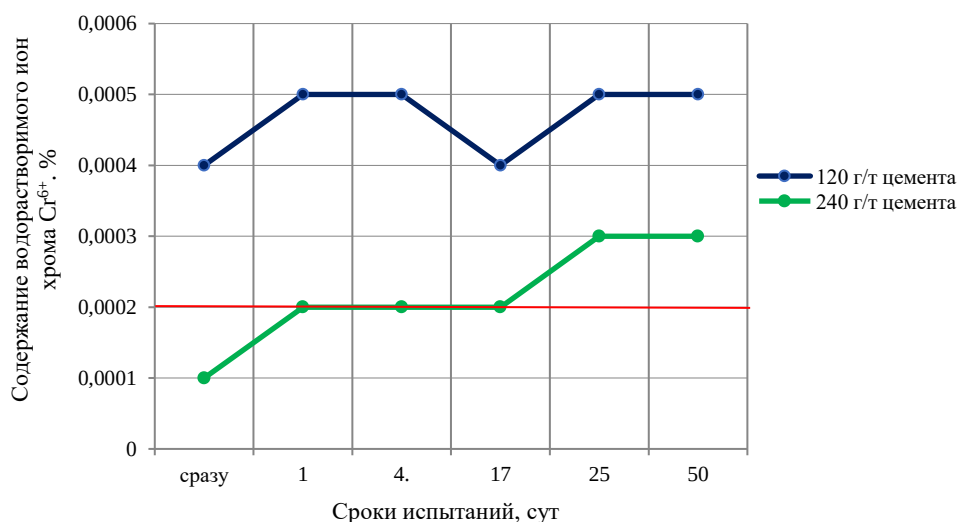


Рис. 2. Динамика поведения добавки дехроматора компании MC-Bauchemie в количестве 120 и 240 г/т цемента с течением времени

Fig. 2. Behavior dynamics of dechromator containing 120 and 240 g/t cement

Основываясь на положительной динамике добавки из расчета 240 г/т, в дальнейших испытаниях, по рекомендации компании MC-Bauchemie, дехроматор разбавили водой в соотношении 1:1 и провели испытания с новыми дозировками. В качестве исходного материала был взят клинкер с содержанием водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) 0,0014 %. Количество вводимой добавки и результат испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie  
в количестве 820 и 1160 г/т цемента

Table 3

Results of testing MC-Bauchemie dechromator containing  
820 and 1160 g/t of cement

| Сроки проведения анализа  | Значение $\text{Cr}^{6+}$ , % |                 |                  |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|
|                           | Клинкер без добавки           | 820 г/т цемента | 1160 г/т цемента |
| Сразу после ввода добавки | 0,0014                        | 0,0000          | 0,0000           |
| Через 1 сут               | –                             | 0,0000          | 0,0000           |
| Через 7 сут               | –                             | 0,0001          | 0,0000           |
| Через 15 сут              | –                             | 0,0002          | 0,0000           |
| Через 21 сут              | –                             | 0,0002          | 0,0001           |
| Через 28 сут              | –                             | 0,0002          | 0,0001           |
| Через 34 сут              | –                             | 0,0003          | 0,0001           |
| Через 41 сут              | –                             | 0,0003          | 0,0000           |

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что при дозировке дехроматора из расчета 820 г/т снижение концентрации водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) с 0,0014 % до нулевого значения было заметно уже в первые сутки и сохранялось до недельного срока. В дальнейшем наблюдается незначительный рост концентрации ионов хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) до 0,0002 % на 15–28-е сут и до 0,0003 % на 34–41-е сут.

Дозировка дехроматора в большем количестве (1160 г/т) дает положительный эффект, снижая концентрацию до нуля и сохраняя значение не более 0,0001 % до 41-х сут. Однако такое поведение добавки может говорить о ее нерациональном расходе, т. к. положительная динамика замечена уже на более низких концентрациях.

Динамика поведения добавки с течением времени показана на рис. 3.

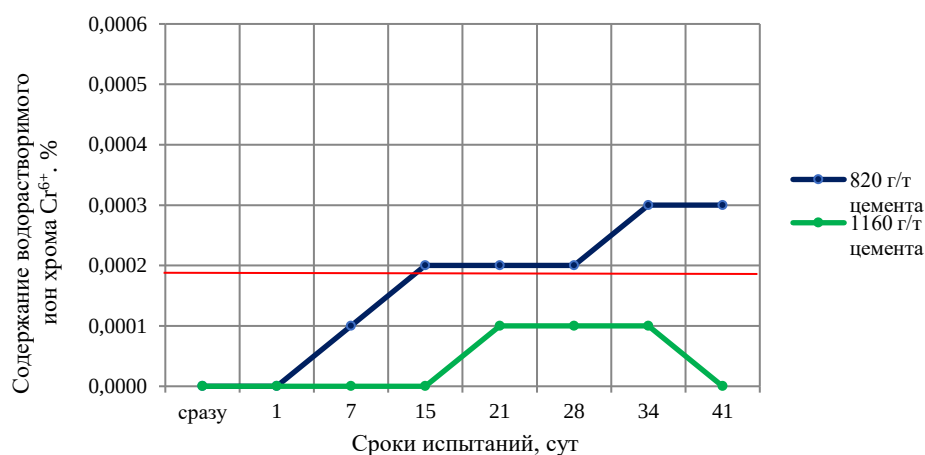


Рис. 3. Динамика поведения добавки дехроматора компании MC-Bauchemie в количестве 820 и 1160 г/т цемента с течением времени

Fig. 3. Behavior dynamics of MC-Bauchemie dechromator consisting of 820 and 1160 g/t of cement

На основе положительных результатов действия образца LP 2911-21 из расчета 820 г/т было принято решение испытать ее в новых условиях помола в этой же дозировке и более низкой – 480 г/т, а также в дозировке 660 г/т, как у аналога компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия», с целью их сравнения.

Совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавки был произведен в лабораторной барабанной мельнице МБЛ [19]. Общая загрузка анализируемых проб составила 2660 г. В табл. 4, 5 приведены результаты испытаний дехроматора.

Таблица 4

**Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie  
в количестве 820 г/т цемента**

Table 4

**MC-Bauchemie Dechromator consisting of 820 g/t cement**

| Сроки проведения анализа | Значение $\text{Cr}^{6+}$ , % |                 |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                          | Клинкер без добавки           | 820 г/т цемента |
| Через 1 сут              | 0,0014                        | 0,0000          |
| Через 7 сут              | –                             | 0,0000          |
| Через 14 сут             | –                             | 0,0000          |
| Через 21 сут             | –                             | 0,0000          |
| Через 28 сут             | –                             | 0,0000          |
| Через 35 сут             | –                             | 0,0000          |

Таблица 5

**Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie  
в количестве 480 и 660 г/т цемента**

Table 5

**MC-Bauchemie Dechromator consisting of 480 and 660 g/t cement**

| Сроки проведения анализа | Значение $\text{Cr}^{6+}$ , % |                 |                 |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
|                          | Клинкер без добавки           | 480 г/т цемента | 660 г/т цемента |
| Через 1 сут              | 0,0012                        | 0,0003          | 0,0001          |
| Через 7 сут              | –                             | 0,0003          | 0,0001          |
| Через 19 сут             | –                             | 0,0003          | 0,0000          |
| Через 29 сут             | –                             | 0,0003          | 0,0000          |

Во всех случаях добавка показала положительную динамику. При вводе ее в количестве 820 и 660 г/т концентрация водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) снижается до нормируемого значения не более 0,0002 % и проявляет устойчивое действие в течение всего наблюдаемого периода (29–35 сут). Дозировка 480 г/т дает незначительное превышение контролируемого показателя и также вызывает устойчивое действие в течение всего наблюдаемого периода.

Динамика поведения добавки с течением времени показана на рис. 4.

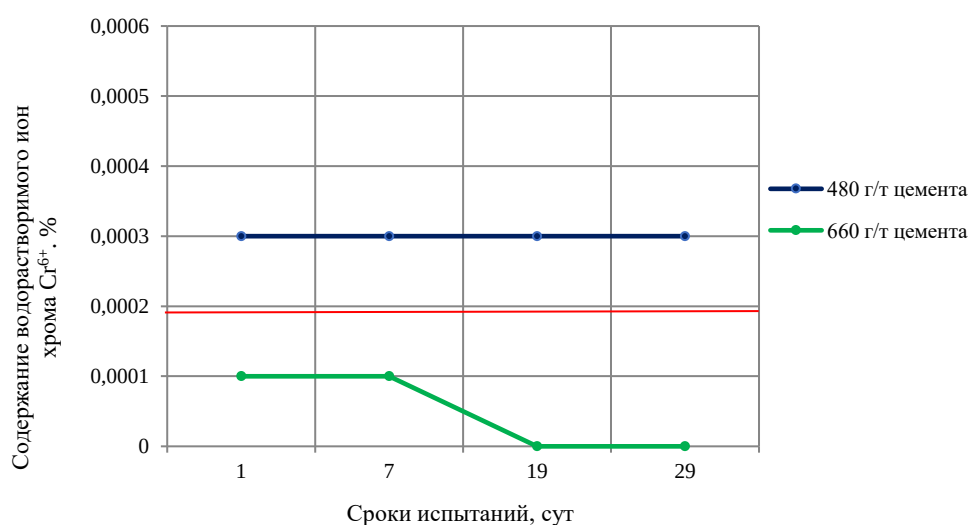


Рис. 4. Динамика поведения добавки дехроматора компании MC-Bauchemie в количестве 480 и 660 г/т цемента с течением времени

Fig. 4. Behavior dynamics of MC-Bauchemie dechromator consisting of 480 and 660 g/t cement

**Этап 2.** Наряду с добавкой дехроматора компании MC-Bauchemie рассматривался ввод аналогичных добавок компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия». В качестве исходного материала был взят клинкер с теми же характеристиками с содержанием водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) 0,0014 %.

Совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавок производился в лабораторной барабанной мельнице МБЛ [20]. Общая загрузка анализируемых проб составила 2660 г. Количество вводимой добавки и результат испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты испытаний дехроматора  
компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия»**

Table 6

**Test results of dechromator from ООО "Sintez OKA-Construction Chemistry"**

| Сроки проведения анализа | Значение $\text{Cr}^{6+}$ , % |                                              |                                               |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                          | Клинкер без добавки           | SintelX 100 (55 г на 1 ppm) 660 г/ т цемента | SintelX 200 (375 г на 1 ppm) 4500 г/т цемента |
| Через 1 сут              | 0,0014                        | 0,0001                                       | 0,0008                                        |
| Через 7 сут              | –                             | 0,0001                                       | 0,0007                                        |
| Через 14 сут             | –                             | 0,0001                                       | 0,0008                                        |
| Через 21 сут             | –                             | 0,0001                                       | 0,0007                                        |
| Через 28 сут             | –                             | 0,0002                                       | 0,0006                                        |
| Через 35 сут             | –                             | 0,0001                                       | 0,0007                                        |

Образец добавки SintelX 100 представляет собой жидкую композицию белого цвета. Количество вводимой добавки производилось исходя из расчета, рекомендуемого компанией, 55 г на снижение 1 ppm (0,0001 %) водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ). Таким образом, чтобы снизить содержание ионов хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) с 0,0014 до 0,0002 %, необходимо ввести 660 г добавки.

Стойкое действие добавки проявлялось на протяжении всего наблюдаемого периода (35 сут).

Образец добавки SintelX 200 представляет собой жидкую композицию коричнево-зеленого цвета. Количество вводимой добавки производилось исходя из расчета, рекомендуемого компанией, 375 г на снижение 1 ppm водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ). Таким образом, чтобы снизить содержание ион хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) с 0,0014 до 0,0002 %, необходимо ввести 4500 г добавки. В рассчитанной дозировке, как видно из данных табл. 6, нужного эффекта испытуемый образец не показал.

Динамика поведения добавок с течением времени показана на рис. 5.

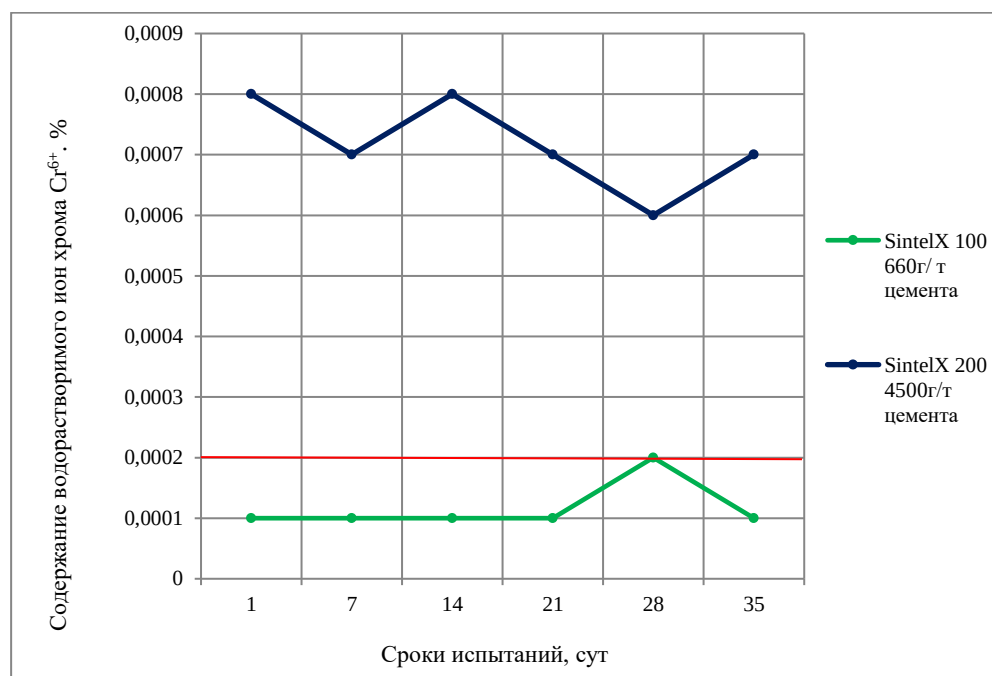


Рис. 5. Динамика поведения добавок дехроматоров компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» с течением времени

Fig. 5. Behavior dynamics of "Sintez OKA-Construction Chemistry" dechromator

### Выводы

В результате испытаний добавок дехроматоров компаний ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» и МС-Vauchemie положительное действие, направленное на снижение концентрации водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) в портландцементе, применяемом при производстве хризотилцементных изделий, показали образцы обеих компаний.



Образец LP 2911-21 компании MC-Bauchemie и образец SintelX 100 компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» проявили одинаковый устойчивый эффект при дозировке 660 г/т цемента. К обеим добавкам оказался актуален расчет исходя из 55 г на снижение 1 ppm (0,0001 %) водорастворимого хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ). Однако дозировка образца LP 2911-21 компании из расчета 480 г/т дала также положительную динамику и незначительное превышение нормируемого значения (табл. 6). Таким образом, можно предположить, что для снижения концентрации ионов хрома ( $\text{Cr}^{6+}$ ) в цементе может быть выбран более низкий расход добавки в промежутке значений 480–660 г/т.

Стоит отметить, что в ходе проводимых испытаний был замечен факт расслоения композиции добавок обеих фирм.

Для проведения испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie разбавление образца водой производилось непосредственно в лаборатории путем механического перемешивания. Расслоение наступало достаточно быстро, в течение первых суток.

На протяжении периода испытаний (двух месяцев) дехроматора компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» расслоения композиции не наблюдалось, но в дальнейшем при хранении более двух месяцев был обнаружен тот же факт. Поэтому стоит учесть, что в случае использования этих добавок необходимо рассмотреть вопрос их дополнительного перемешивания при хранении для предотвращения процесса расслоения.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 05.15-19М.226П. Портландцемент с ограниченным содержанием водорастворимых соединений хрома // РЖ 19М. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов. 2005. № 15. EDN: HOZDPP
2. Пуненков С.Е. Проблемы и перспективы производства хризотилцементных материалов // Новости науки и технологий. 2024. № 1 (68). С. 8–14. EDN: TMHNMX
3. Патент № 94021646/04 Российская Федерация, МПК C04B 28/04, C04B 14/28, C04B 22/04, C04B 24/18, C04B 18/14, A61K 33/00. Способ предотвращения аллергических реакций, вызываемых воздействием водорастворимого шестивалентного хрома  $\text{Cr}^{6+}$ , содержащегося в цементе и/или цементосодержащих составах : № 94021646/04 : заявл. 22.06.1994 : опубл. 10.05.1999 / Фолькхарт Р., Михаэль Ю., Габриэлла А. 9 с.
4. Панова А.В. Технологии производства цемента и негативное воздействие на окружающую среду // Молодой ученый. 2022. № 1. С. 21–23.
5. Зима А.Г. Экологичность конструкционных строительных материалов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 2. С. 40–49.
6. *Современные проблемы экологии* : доклады XIX Международной научно-технической конференции, Тула, 20 октября 2017 г. / под общ. ред. В.М. Панарина. Тула : Инновационные технологии, 2017. 124 с. ISBN: 978-5-9909-4915-7. EDN: ZWQWQD
7. Алешко О.С. Промышленность строительных материалов в ресурсном обеспечении экономического развития России // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2008. Т. 6. С. 439–461. EDN: KWBWDV
8. Курбангалеева М.Х., Пергушова Л.Р., Минниханова Э.А. Минимизация содержания соединений шестивалентного хрома в сточных водах производства асбестоцементных изделий // Башкирский химический журнал. 2014. Т. 21. № 2. С. 113–116.
9. Патент № 2003109255/03 Российская Федерация, МПК C04B 7/02. Портландцемент с ограниченным содержанием водорастворимых соединений хрома : № 2003109255/03 : заявл. 03.04.2003 : опубл. 20.05.2005 / Юдович Б.Э., Зубехин С.А., Губарев В.Г. 21 с.
10. Алишев Ш.А. Технологии производства цемента // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017) : труды Международной научно-технической конференции, Самара,

- 14–16 марта 2017 г. Самара : Самарский научный центр РАН, 2017. С. 843–846. EDN: YOWSRT
11. Горьянова А.О. Состояние и перспективы развития асбестоцементной отрасли // Образование. Наука. Производство : материалы XI Международного молодежного форума, Белгород, 01–20 октября 2019 г. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 1908–1911. EDN: OWLNTU
  12. Сычев М.М., Корнеев В.И., Федоров Н.Ф. Алит и белит в портландцементном клинкере и процессы легирования. Москва : Стройиздат, 1965. 152 с.
  13. Шеин А.Л. Применение рентгенофазового анализа для контроля качества вяжущих в технологии сухих строительных смесей // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009. № 1 (8). С. 85–88. EDN: OONGUH
  14. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р., Бурлов И.Ю. Основные направления в химии и технологии специальных цементов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 61–63. EDN: JXKGLP
  15. Каверина Н.В., Назаренко Н.Н., Ашихмина Т.В. Нормирование нагрузки хрома шестивалентного при оценке накопленного вреда окружающей среде // Проблемы загрязнения объектов окружающей среды тяжелыми металлами : труды Международной конференции, Тула, 28–30 сентября 2022 г. Тула : Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2022. С. 269–272. EDN: KELGEU
  16. Ассакунова Б.Т., Абдыкалыков Т.А. Влияние комплексных модификаторов на свойства портландцемента // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2012. № 3. С. 21–25.
  17. Курбангалеева М.Х., Пергушова Л.Р., Минниханова Э.А. Разработка мероприятий по минимизации соединений хрома (VI) в сточных водах производства асбестоцементных изделий // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 1. С. 38–41.
  18. Коробова О.С., Ткачева А.С. Перспективы внедрения наилучших доступных технологий при производстве цемента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 90–95.
  19. Дурдыханов Г.Г., Алыев М.Х., Сапаров Б.Б. Основные свойства и особенности производства портландцемента // Вестник науки. 2024. Т. 2. № 4 (73). С. 634–638.
  20. Лоик Т.А. Исследование влияния условий помола клинкера на свойства портландцемента // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2019 г. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 2528–2536. EDN: KLTMCР

## REFERENCES

1. 05.15-19M.226P. Portland Cement with Limited Content of Water-Soluble Chromium Compounds. *Tekhnologiya silikatnykh i tugoplavkikh nemetallicheskich materialov*. 2005; (15). EDN: HOZDPP (In Russian)
2. Punenkov S.E. Problems and Prospects of Chrysotile Cement Material Production. *Novosti nauki i tekhnologii*. 2024;1 (68): 8–14. EDN: TMHNMX (In Russian)
3. Volkhart R., Michael J., Gabriella A. “Method for preventing allergic reactions caused by exposure to water-soluble hexavalent chromium Cr<sup>6+</sup> in cement and/or cement-containing compositions”. Russ. Fed. Patent No. 2129868 C1, 1999. 9 p. (In Russian)
4. Panova A.V. Cement Production and Negative Impact on the Environment. *Molodoi uchenyi*. 2022; 1 (396): 21–23. (In Russian)
5. Zima A.G. Environmental Friendliness of Building Materials. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*. 2020; 2 (32): 40–49. (In Russian)
6. Panarin V.M. Innovation Technologies. In: *Proc. 19th Int. Sci. Conf. 'Modern Problems of Ecology'*. 2017. 124 p. ISBN: 978-5-9909-4915-7. EDN: ZWQWQD (In Russian)
7. Aleshko O.S. Building Materials Industry in Resource Provision of Economic Development in Russia. *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaistvennogo prognozirovaniya RAN*. 2008; 6: 439–461. (In Russian)

8. Kurbangaleeva M.Kh., Pergushova L.R., Minnikhanova E.A. Minimization of Hexavalent Chromium Compounds in Wastewater from Asbestos-Cement Product Production. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal*. 2014; 21 (2): 113–116. (In Russian)
9. Yudovich B.E., Zubekhin S.A., Gubarev V.G. "Portland cement with limited content of water-soluble chromium compounds". Russ. Fed. Patent No. 2252201 C2, 2005. 21 p. (In Russian)
10. Alishev Sh.A. Cement Production Technologies. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Advanced Information Technologies'*. Samara, 2017. Pp. 843–846. (In Russian)
11. Goryanova A.O. Status and Development Prospects of Asbestos-Cement Industry. In: *Proc. 21st Int. Youth Forum 'Education. Science. Production'*. Belgorod, 2019. Pp. 1908–1911. (In Russian)
12. Sychev M.M., Korneev V.I., Fedorov N.F. Alite and Belite in Portland Cement Clinker and alloying Processes. Moscow: Stroyizdat, 1965. Pp. 23–25. (In Russian)
13. Shein A.L. X-ray Phase Analysis in Binder Quality Control in Dry Building Mixture Technology. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2009; 1 (8): 85–88. (In Russian)
14. Kuznetsova T.V., Krivoborodov Yu.R., Burlov I.Yu. Main directions in the chemistry and technology of special cements. *Stroitel'nye materialy*. 2008; (10): 61–63. EDN: JXKGLP (In Russian)
15. Kaverina N.V., Nazarenko N.N., Ashikhmina T.V. Standardization of Hexavalent Chromium Load in assessing the Accumulated Harm to the Environment. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Problems of Environmental Pollution with Heavy Metals'*. Tula, 2022. Pp. 269–272. (In Russian)
16. Assakunova B.T., Abdykalykov T.A. Influence of Complex Modifiers on Portland Cement Properties. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*. 2012; (3): 21–25. (In Russian)
17. Kurbangaleeva M.Kh., Pergushova L.R., Minnikhanova E.A. Development of Measures to Minimize Chromium(VI) Compound Content in Wastewater from Asbestos-Cement Production. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2015; 19 (1): 38–41. (In Russian)
18. Korobova O.S., Tkacheva A.S. Prospects of Implementing the Best Available Technologies in Cement Production. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2016; (11): 90–95. (In Russian)
19. Durdykhanov G.G., Allyev M.Kh., Saparov B.B. Main Properties and Production of Portland Cement. *Vestnik nauki*. 2024; 2 (4 (73)): 634–638. (In Russian)
20. Loik T.A. Influence of Clinker Grinding Conditions on Portland Cement Properties. In: *Proc. Int. Sci. Conf. Young Scientists*. Belgorod, 2019. Pp. 2528–2536. EDN: KLTMC (In Russian)

#### Сведения об авторах

Крутилин Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, kotyra84@bk.ru

Крапчетова Татьяна Владимировна, инженер-аналитик, АО «Себряковцемент», 403342, г. Михайловка, ул. Индустриальная, 2, iwankra@mail.ru

Инькова Надежда Александровна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, soyote@bk.ru

Пахомова Олеся Константиновна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, pahomovaolesia@yandex.ru

#### Authors Details

Aleksandr A. Krutinin, PhD, A/Professor, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Russia, kotyra84@bk.ru

Tatyana V. Krapchetova, Analytical Engineer, AO "Sebyakovtsement", 2, Industrialnaya Str., 2403342, Mikhailovka, Russia, iwankra@mail.ru

*Nadezhda A. Inkova*, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Russia, coyote@bk.ru

*Olesya K. Pakhomova*, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Russia, pahomovaolesia@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 15.04.2025  
Одобрена после рецензирования 30.06.2025  
Принята к публикации 30.06.2025

Submitted for publication 15.04.2025  
Approved after review 30.06.2025  
Accepted for publication 30.06.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 247–255.

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 (5): 247–255.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.2955`24`26

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255

EDN: SVYNEO

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

**Евгений Олегович Винокуров, Анатолий Анатольевич Клопотов,  
Юрий Афанасьевич Абзаев**

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

**Аннотация.** Актуальность исследования метаматериалов обусловлена потребностью в создании материалов с принципиально новыми свойствами, не встречающимися в природе. Способность проявлять аномальные механические характеристики открывает широкие возможности применения таких материалов в различных отраслях. Разработка метаматериалов на основе интеллектуальных сплавов, в частности никелида титана с эффектом памяти формы, позволяет создавать конструкции, сочетающие уникальную геометрию с функциональностью, что особенно востребовано при создании имплантатов нового поколения, энергопоглощающих систем и адаптивных механических элементов.

**Цель.** Исследование механических свойств конструкций, изготовленных из сплава на основе никелида титана с эффектом памяти формы, проявляющих положительные и отрицательные значения коэффициента Пуассона, как элементов конструкции метаматериала.

**Материалы и методы.** Эксперимент включал испытания на сжатие двух видов проводочных конструкций из сплава Ti-51 ат.% Ni.

**Результаты.** Установлено, что в зависимости от конструкции образцы демонстрировали как положительный, так и отрицательный коэффициент Пуассона. Деформационные кривые показали практически полное восстановление формы обеих конструкций после снятия нагрузки, что подтверждено экспериментально.

**Ключевые слова:** коэффициент Пуассона, сплавы с эффектом памяти формы, конструкция из сплава на основе никелида титана, метаматериалы, ауксетики, сверхэластичность

**Для цитирования:** Винокуров Е.О., Клопотов А.А., Абзаев Ю.А. Механические свойства метаматериалов и конструкций на основе сплавов с эффектом памяти формы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 247–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255. EDN: SVYNEO

## ORIGINAL ARTICLE

**MECHANICAL PROPERTIES OF METAMATERIALS  
AND STRUCTURES BASED ON SHAPE MEMORY ALLOYS**

**Eugeny O. Vinokurov, Anatoly A. Klopotov, Yury A. Abzaev**  
*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The relevance of research on metamaterials is driven by the need to create materials with fundamentally new properties not found in nature. The ability to exhibit anomalous mechanical characteristics opens up opportunities for breakthrough applications in various industries. The development of metamaterials based on intelligent alloys, particularly titanium nickelide with a shape memory effect, enables the creation of structures that combine unique geometry with functionality, which is especially in demand for next-generation implants, energy-absorbing systems, and adaptive mechanical components.

**Purpose:** To investigate the mechanical properties of structures made of titanium nickelide-based alloy with a shape memory effect, exhibiting both positive and negative Poisson's ratio values, as elements of metamaterial structures.

**Methodology:** The experiment involved compression tests of two types of wire structures made of Ti-51 at. % Ni alloy.

**Research findings:** It was found that, depending on the structure, the samples exhibited both positive and negative Poisson's ratios. The deformation curves showed almost complete shape recovery of both structures after load removal, which was confirmed experimentally.

**Keywords:** Poisson's ratio, shape memory alloys, titanium nickelide-based alloy structure, metamaterials, auxetics, superelasticity

**For citation:** Vinokurov E.O., Klopotov A.A., Abzaev Yu.A. Mechanical Properties of Metamaterials and Structures Based on Shape Memory Alloys. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 247–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255. EDN: SVYNEO

**Введение**

Использование мартенситных превращений берет начало в древнем ремесленном опыте, когда кузнецы эмпирически открыли операцию закалки стали, придающую изделиям высокую твердость и режущую способность. Как объект научного исследования закалка стали стала изучаться в XIX в., главным образом в трудах русских и немецких металлургов. В честь одного из них – А. Мартенса – особое структурное состояние закаленной стали, определяющее ее свойства, было названо мартенситом, а соответствующий фазовый переход – мартенситным превращением [1].

Долгое время мартенситное превращение рассматривалось как специфический процесс, характерный лишь для системы «железо – углерод». Однако начиная с 1930-х гг. круг материалов, в которых обнаруживались мартенситные превращения, существенно расширился. К сталям добавились безуглеродистые сплавы железа, сплавы на основе меди, титана, циркония, щелочных и благородных металлов [2]. В настоящее время установлено, что мартенситные и мартенситоподобные превращения присущи не только металлам, но и другим классам кристаллических материалов, включая сегнетоэлектрики, оксиды, молекулярные кристаллы и даже биологические объекты (например, белки у микроорганизмов) [3, 4].

Особый практический интерес представляют превращения, протекающие по бездиффузионному механизму с кооперативной перестройкой кристаллической решетки, которые лежат в основе эффекта памяти формы (ЭПФ). Открытие ЭПФ относится к 1932 г., когда А. Оландер впервые наблюдал это явление в сплаве Au-Cd [5]. В 1950-х гг. эффект был обнаружен в медно-цинковых сплавах, а его механизм – обратимое термоупругое мартенситное превращение – был описан Г.В. Курдюмовым [6]. Наиболее широкое практическое применение нашел сплав на основе никелида титана (TiNi), сочетающий высокую обратимость деформации, коррозионную стойкость, прочность и биосовместимость [7, 20].

В последние десятилетия активно развивается направление, связанное с созданием метаматериалов – искусственных структур, свойства которых определяются не столько химическим составом, сколько их архитектурой [8, 9]. Комбинирование метаматериалов со сплавами, обладающими ЭПФ, открывает перспективы для проектирования конструкций с программируемыми механическими характеристиками, такими как отрицательный коэффициент Пуассона, регулируемая жесткость и адаптивность [10].

Метаматериалы представляют собой искусственно созданные материалы, обладающие уникальными, не встречающимися в природе свойствами. В основе работы этих материалов лежит использование физических явлений, которые проявляются за счет созданной специфической структуры со сложной архитектурой, а не за счет их химического состава [11–13]. Метаматериалы известны своими необычными механическими свойствами, такими как низкая плотность [14], отрицательный коэффициент Пуассона [15], отрицательная жесткость [15] и отрицательное тепловое расширение [16].

Коэффициент Пуассона  $\nu$  относится к тем основным механическим параметрам материала, манипулирование которыми открывает широкие перспективы для создания современных материалов с улучшенными механическими характеристиками и многофункциональными возможностями. Основная масса материалов обладает положительными значениями коэффициента Пуассона. Например, при одноосном сжатии материал в продольном направлении уменьшается и расширяется в поперечном направлении. Все материалы с отрицательными значениями коэффициента Пуассона  $\nu$  называют ауксетичными. Для таких материалов характерно расширение в поперечном направлении при растяжении в осевом направлении [17].

Рассмотрим условия, при которых возможны значения  $\nu < 0$ . Согласно классическим соотношениям из теории упругости для изотропных тел [18], коэффициент Пуассона  $\nu$  можно записать в виде

$$\nu = (3K - 2\mu)/(6K + 2\mu),$$

где  $\mu$ ,  $K$  – модули сдвига и объемной деформации соответственно, положительные для стабильных структур. Из этого уравнения следует, что отрицательные значения коэффициента Пуассона  $\nu$  соответствуют условию, когда  $\mu > 3/2K$ . То есть когда модуль сдвига  $\mu$  превышает модуль объемной деформации  $K$  более чем на 50 %. Эти значения коэффициента Пуассона  $\nu$  в основном достигаются за счет архитектуры конструкции, а не за счет состава материала [19].



В исследовании [8] приведен обзор широко используемых механических метаматериалов и обсуждение их применения в области биомедицинской инженерии, в частности в инженерии костной ткани и сосудистых стентов. На рис. 1 наглядно показано, что сочетание реконфигурируемого и ауксетического поведения создает новую трубчатую структуру стента. Длина стента увеличивается при радиальном расширении, что позволяет охватить большее количество сосудов по сравнению с обычными стентами [8]. Данные рис. 1 наглядно демонстрируют, как материалы с отрицательными значениями коэффициента Пуассона находят практическое применение.

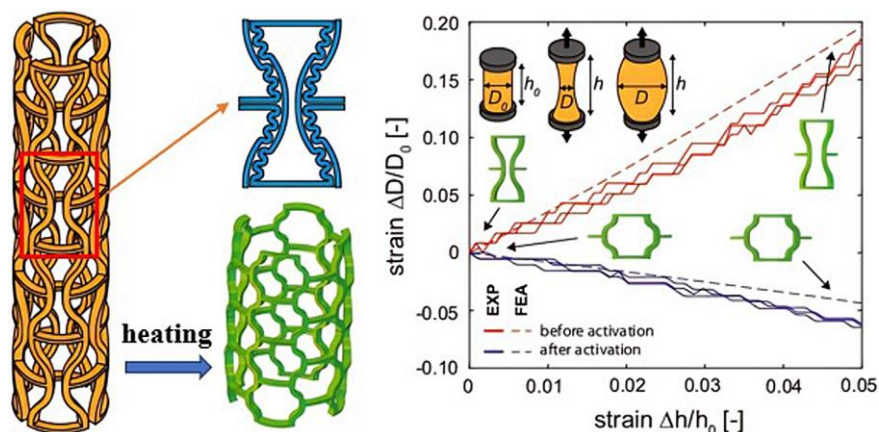


Рис. 1. Пример реконфигурируемого ауксетического сосудистого стента [8]

Fig. 1. An example of a reconfigurable auxetic vascular stent [8]

Для выполнения цели работы были изготовлены две проволочные конструкции из сплава Ti+51 ат.%Ni с диаметром проволоки 1 мм. Конструкция № 1 (рис. 2, а) содержит вогнутые проволочные элементы. При сжатии образца № 1 происходит продольное и поперечное сжатие конструкции. Эта конструкция обладает отрицательным значением коэффициента Пуассона ( $\nu = -3,03$ ).

Конструкция № 2 (рис. 2, б) содержит проволочные элементы, выгнутые наружу относительно оси сжатия. При одноосной деформации сжатием наблюдается продольное сжатие конструкции с поперечным расширением элементов конструкции, и для этой конструкции  $\nu = 0,71$ .

Механические испытания по сжатию проволочных конструкций проведены на испытательной машине Instron № 3382.

Определение значений коэффициента Пуассона  $\nu$  получено на основе измерений геометрических размеров конструкций до эксперимента, во время и после эксперимента.

В результате механических испытаний образцов № 1 и № 2 были получены деформационные кривые (рис. 3).

Из анализа деформационной кривой образца № 1 видно, что внешняя механическая сила ( $P$ ) растет и достигает максимального значения при деформации  $\varepsilon = 0,065$  (рис. 3, кривая 1, т. а), после которой деформация конструкции продолжается, но уже при меньших значениях приложенной механической

силы (рис. 3, кривая 1). Подобная зависимость в координатах « $P$  от  $\epsilon$ » наблюдается на деформационной кривой конструкции № 2 (рис. 3, кривая 2). На этой деформационной кривой максимум выражен менее остро, чем для образца № 1, и максимум на этой кривой приходится уже на значение деформации, равное 0,115 (рис. 3, кривая 2, т. б).

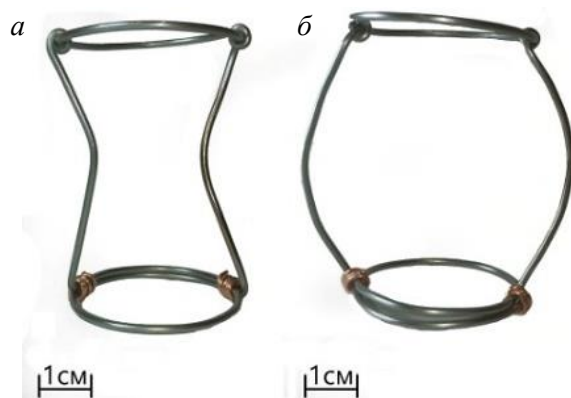


Рис. 2. Фотографии конструкций из сплава на основе никелида титана перед деформацией на сжатие:

$a$  – конструкция № 1;  $b$  – конструкция № 2

Fig. 2. Photographs of titanium nickelide alloy structures before compressive strain:

$a$  – structure 1;  $b$  – structure 2

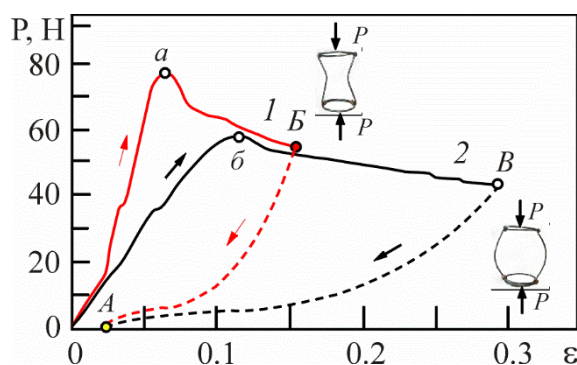


Рис. 3. Деформационные кривые на сжатие конструкций с отрицательным значением коэффициента Пуассона (конструкция № 1, кривая 1) и положительным (конструкция № 2, кривая 2), изготовленных из сплава Ti + 51 ат. % Ni

Fig. 3. Compressive strain curves for Ti + 51 at. % Ni alloy structures with negative Poisson's ratio (structure 1, curve 1) and positive (structure 2, curve 2)

Такой характер деформационных зависимостей исследуемых конструкций в координатах « $P$  от  $\epsilon$ » можно объяснить, основываясь на полученных деформационных кривых одноосного растяжения образцов сплава Ti + 51 ат. % Ni в координатах « $\sigma$  от  $\epsilon$ » (рис. 4) [7]. На начальной стадии, в зависимости  $\sigma = f(\epsilon)$ , происходит упругопластическая деформация до значений порядка 0,01 (рис. 4, участок  $A-I$ ). По достижении значений напряжения около 400 МПа в процессе деформа-

ции под напряжением начинается мартенситный переход (МП), который проявляется в виде площадки в координатах « $\sigma$  от  $\epsilon$ » (рис. 4, участок 1–2) [7].

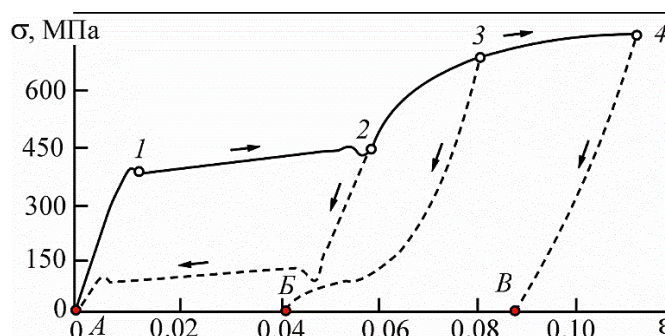


Рис. 4. Влияние степени деформации на сверхэластичное поведение сплава Ti + 51 ат. % Ni. В т. 2 и 3 нагрузка снималась. Штриховая кривая 2 – A соответствует полному возврату деформации после снятия нагрузки; штриховые кривые 3 – B, 4 – B соответствуют неполному возврату деформации после снятия нагрузки [7]

Fig. 4. Stress-strain curves for superelastic behavior of Ti + 51 at. % Ni alloy. The load is removed at points 2 and 3. Dashed curve 2 – A and curves 3 – B, 4 – B indicate to respectively complete and incomplete strain recovery after load removal [7]

На стадии МП после снятия внешней нагрузки происходит полный возврат деформации (рис. 4, кривая 2 – A). При дальнейшей деформации в образце в локальных местах материала достигается предел текучести (рис. 4, участок 2 – 3 – 4), и в деформацию вносит вклад пластическая составляющая. После снятия нагрузки на этой стадии возврат деформации происходит не полностью (рис. 4, кривые 3 – B, 4 – B). Для исследуемых конструкций после снятия нагрузки происходит почти полный возврат деформации (рис. 4, кривые B – A, B – A). Это явление мы наблюдали экспериментально. Конструкции после снятия нагрузки почти полностью восстанавливали форму.

Таким образом, в исследуемых конструкциях первая стадия деформации от 0 до максимума на кривых в координатах « $P$  от  $\epsilon$ » связана с упругопластическими деформациями в материале. На следующей стадии уменьшение нагрузки  $P$  после максимума на кривых « $P$  от  $\epsilon$ » связано с мартенситными переходами под напряжением.

### Вывод

Установлено, что ключевым фактором, обеспечивающим функциональность конструкций, является сверхэластичный отклик материала основы, обусловленный обратимыми мартенситными превращениями. Полученные результаты открывают перспективы для разработки нового поколения функциональных материалов и конструкций, которые можно использовать в качестве биомедицинских имплантатов с адаптивными механическими характеристиками [8, 20].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мартенситные превращения / под ред. В.Д. Садовского. Свердловск : УФ АН СССР, 1980. 215 с.

2. Горячев О.А., Утевский Л.М. Мартенситные превращения в сплавах железа. Москва : Металлургия. 1986. 184 с.
3. Bhattacharya K. Microstructure of Martensite: Why It Forms and How It Gives Rise to the Shape-Memory Effect. Oxford : Oxford University Press, 2003. 196 p. DOI: 10.1093/oso/9780198509349.001.0001
4. Otsuka K., Wayman C.M. Shape Memory Materials. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 284 p.
5. Olander A. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys // Journal of the American Chemical Society. 1932. V. 54. P. 3819–3833. DOI: 10.1021/ja01349a004
6. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска стали. Москва : Металлургиздат, 1960. 255 с.
7. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Клопотов А.А. Никелид титана: медицинский материал нового поколения. Томск : МИЦ, 2006. 296 с.
8. Wang H., Lyu Y., Bosiakov S., Zhu H., Ren Y. A review on the mechanical metamaterials and their applications in the field of biomedical engineering // Frontiers in Materials. 2023. V. 10. P. 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2023.1146942. EDN: NDLKSF
9. Kolken H.M.A., Zadpoor A.A. Auxetic mechanical metamaterials // RSC Advances. 2017. V. 7. P. 5111–5129. DOI: 10.1039/C6RA27333E. EDN: YEALQG
10. Tang Y., Yin J. Design of cut unit geometry in hierarchical kirigami-based auxetic metamaterials for high stretchability and compressibility // Extreme Mechanics Letters. 2017. V. 12. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.eml.2016.07.005
11. Шилько С.В. Аномально упругие материалы как компоненты адаптивных систем // Перспективные материалы. Витебск : УО ВГТУ, 2009. С. 419–448.
12. Daniel A., Bakhtiari H., Nouri A., Das B.K., Aamir M., Tolouei-Rad M. Fatigue properties of 3D-printed polymeric metamaterials: A review // Smart Materials in Manufacturing. 2025. V. 3. P. 20. DOI: 10.1016/j.smmf.2025.100076. EDN: AIVPTT
13. Lee J.H., Singer J.P., Thomas E.L. Micro-nanostructured mechanical metamaterials // Advanced materials. 2012. V. 24. I. 36. P. 4782–4810. DOI: 10.1002/adma.201201644. EDN: RMGSZB
14. Zheng X., et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials // Science. 2014. V. 344. № 6190. P. 1373–1377. DOI: 10.1126/science.1252291
15. Hewage T.A., et al. Double-negative mechanical metamaterials displaying simultaneous negative stiffness and negative Poisson's ratio properties // Advanced materials. 2016. V. 28 (46). P. 10323–10332. DOI: 10.1002/adma.201603959
16. Wang Q., et al. Light weight mechanical metamaterials with tunable negative thermal expansion // Physical Review Letters. 2016. V. 117. P. 175901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.175901
17. Barnett E., et al. Auxetic fixation devices can achieve superior pullout performances compared to standard fixation concepts // Smart materials and Structures. 2024. V. 33. № 6. P. 065020. DOI: 10.1088/1361-665X/ad3d94. EDN: WLLMUY
18. Love A.E.H. A treatise on the mathematical theory of elasticity. New York: Dover Publications, 1944. 674 p.
19. Kolken H.M.A., et al. Rationally designed meta-implants: a combination of auxetic and conventional meta-biomaterials // Materials Horizons. 2018. V. 5. № 1. P. 28–35. DOI: 10.1039/C7MH00699A
20. Сысолятин П.Г., Темерханов Ф.Т., Пушкарев В.П., Клопотов А.А. и др. Сверхэластичные имплантаты с памятью формы в челюстно-лицевой хирургии, ортопедии и нейрохирургии. Томск : ТГУ, 1995. 224 с.

#### REFERENCES

1. Sadovsky V.D. (Ed.) Martensitic Transformations. Sverdlovsk: UF AN SSSR, 1980. 215 p. (In Russian)
2. Goryachev O.A., Utevsky L.M. Martensitic Transformations in Iron Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1986. 184 p. (In Russian)
3. Bhattacharya K. Microstructure of Martensite: Why it Forms and How it Gives Rise to the Shape-Memory Effect. Oxford: Oxford University Press, 2003. 196 p.
4. Otsuka K., Wayman C.M. Shape Memory Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 284 p.
5. Olander A. An Electrochemical Investigation of Solid Cadmium-Gold Alloys. *Journal of the American Chemical Society*. 1932; 54: 3819–3833.

6. Kurdjumov G.V. Phenomena of Steel Hardening and Tempering. Moscow: Metallurgizdat, 1960. 255 p. (In Russian)
7. Gunther V.E., Khodorenko V.N., Klopotov A.A. Titanium Nickelide: Medical Material of New Generation. Tomsk: MIC, 2006. 296 p. (In Russian)
8. Wang H., Lyu Y., Bosiakov S., Zhu H., Ren Y. A Review on the Mechanical Metamaterials and their Applications in the Field of Biomedical Engineering. *Frontiers in Materials*. 2023; 10: 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2023.1146942
9. Kolken H.M.A., Zadpoor A.A. Auxetic Mechanical Metamaterials. *RSC Advances*. 2017; 7: 5111–5129. DOI: 10.1039/C6RA27333E
10. Tang Y., Yin J. Design Of Cut Unit Geometry in Hierarchical Kirigami-Based Auxetic Metamaterials for High Stretchability and Compressibility. *Extreme Mechanics Letters*. 2017; 12: 77–85. DOI: 10.1016/j.eml.2016.07.005
11. Shilko S.V. Anomalous Elastic Materials as Components of Adaptive Systems. In: *Advanced Materials*. Vitebsk, 2009. Pp. 419–448. (In Russian)
12. Daniel A., Bakhtiari H., Nouri A., Das B.K., Aamir M., Tolouei-Rad M. Fatigue Properties of 3D-printed Polymeric Metamaterials: A Review. *Smart Materials in Manufacturing*. 2025; 3: 20. DOI: 10.1016/j.smmf.2025.100076. EDN: AIVPTT
13. Lee J.H., Singer J.P., Thomas E.L. Micro-Nanostructured Mechanical Metamaterials. *Advanced Materials*. 2012; 24 (36): 4782–4810. DOI: 10.1002/adma.201201644
14. Zheng X., Lee H., Weisgraber T.H., Shusteff M., DeOtte J., Duoss E.B., et al. Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials. *Science*. 2014; 344 (6190): 1373–1377. DOI: 10.1126/science.1252291
15. Hewage T.A.M., Alderson K.L., Alderson A., Scarpa F. Double-Negative Mechanical Metamaterials Displaying Simultaneous Negative Stiffness and Negative Poisson's Ratio Properties. *Advanced Materials*. 2016; 28 (46): 10323–10332. DOI: 10.1002/adma.201603959
16. Wang Q., Jackson J.A., Ge Q., Hopkins J.B., Spadaccini C.M., Fang N.X. Lightweight Mechanical Metamaterials with Tunable Negative Thermal Expansion. *Physical Review Letters*. 2016; 117: 175901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.175901
17. Barnett E., Gleadall A., Al Obaidi H., Wang K., Abo Saleh K., Kormakov S., et al. Auxetic Fixation Devices can Achieve Superior Pullout Performances Compared to Standard Fixation Concepts. *Smart Materials and Structures*. 2024; 33 (6): 065020. DOI: 10.1088/1361-665X/ad3d94
18. Love A.E.H. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. New York: Dover Publications, 1944. 674 p.
19. Kolken H.M.A., Lietaert K., Pouran B., Meynen A., Van Grunsven W., Weinans H., et al. Rationally Designed Meta-Implants: A Combination of Auxetic and Conventional Meta-Biomaterials. *Materials Horizons*. 2018; 5 (1) 28–35. DOI: 10.1039/C7MH00699A
20. Sysolyatin P.G., Temerkhanov F.T., Pushkarev V.P., Klopotov A.A., et al. Superelastic Shape Memory Implants in Maxillofacial Surgery, Orthopedics and Neurosurgery. Tomsk: TSU, 1995. 224 p. (In Russian)

#### Сведения об авторах

Винокуров Евгений Олегович, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, eugenevinockuroff@yandex.ru

Клопотов Анатолий Анатольевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, klopotovaa@tsuab.ru

Абзаев Юрий Афанасьевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, abzaev@tsuab.ru

#### Authors Details

Evgeny O. Vinokurov, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, eugenevinockuroff@yandex.ru

Anatoly A. Klopotov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, klopotovaa@tsuab.ru

Yury A. Abzaev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2,  
Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, abzaev@tsuab.ru

**Вклад авторов**

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

**Authors contributions**

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

Статья поступила в редакцию 25.09.2025  
Одобрена после рецензирования 30.09.2025  
Принята к публикации 30.09.2025

Submitted for publication 25.09.2025  
Approved after review 30.09.2025  
Accepted for publication 30.09.2025

# 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. № 5. С. 256–267.

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 (5): 256–267.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7:528.024.7

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-256-267

EDN: XKIJU

### ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ РОВНОСТИ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ПРОФИЛОМЕТРАМИ И УНИВЕРСАЛЬНЫМ ДОРОЖНЫМ КУРВИМЕТРОМ «РОВНОСТЬ»

**Владимир Васильевич Щербаков, Сергей Сергеевич Акимов,  
Ольга Владимировна Ковалева**

*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** В настоящее время применение дорожных профилометров является основным способом для определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог в соответствии с действующими нормативами. Методы определения ровности дорожных покрытий с использованием профилометров принципиально отличаются от методов, в основе которых лежит нивелирование.

**Цель работы** – сравнительный анализ особенностей определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог профилометрами и методом амплитуд.

Отличия между данными методами заключаются как в самих способах измерений амплитуд и длин неровностей, так и в организации работ, подготовке к измерениям и непосредственном их выполнении, точности и стабильности результатов измерений. Принципиально отличаются и факторы, влияющие на точность измерений.



Для каждого профилометра требуется калибровка. Сущность калибровки заключается в сравнении данных, полученных профилометром, с данными короткошагового геометрического нивелирования, расчете масштабного коэффициента. Масштабный коэффициент позволяет учесть все индивидуальные особенности автомобиля и условия калибровки. При смене условий при измерениях учесть изменения масштабного коэффициента возможно аналитически, а практически это довольно сложный процесс. Основным ограничением короткошагового нивелирования на автомобильных дорогах является высокая трудоемкость при выполнении измерений. Данный метод может применяться в больших объемах при решении задачи автоматизации процесса нивелирования.

**Выводы.** В Сибирском государственном университете путей сообщения разработано устройство, обеспечивающее короткошаговое нивелирование в автоматическом режиме с шагом 5–15 см и точностью измерения приращений высот 1 мм. Прибор УДК «Ровность» обеспечивает измерение высотных отметок, определение амплитуд неровностей, длин неровностей с преобразованием данных в интегральные показатели в соответствии с требованиями. На точность измерений УДК «Ровность» не оказывают существенного влияния внешние факторы.

**Ключевые слова:** автомобильные дороги, покрытие автомобильной дороги, продольная ровность, методы измерения ровности, дорожный профилометр

**Для цитирования:** Щербаков В.В., Акимов С.С., Ковалева О.В. Особенности определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог профилометрами и универсальным дорожным курвиметром «Ровность» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 256–267. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-256-267. EDN: XKIJU

## ORIGINAL ARTICLE

### LONGITUDINAL FLATNESS OF ROAD PAVEMENTS MEASURED WITH PROFILOMETER AND UNIVERSAL CURVIMETER “ROVNOST”

Vladimir V. Shcherbakov, Sergei S. Akimov, Ol'ga V. Kovaleva  
Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** The use of road profilometers is currently the main tool to measure the longitudinal flatness of road pavements in accordance with standards. Measurement methods of road pavement flatness using profilometers fundamentally differ from those based on leveling.

**Purpose:** The purpose of the work is to compare measurements of road flatness with profilometers and the amplitude method.

**Methodology/approach:** Comparative analysis, profilometer based measurement, curvimeter based measurement. The curvimeter "Rovnost" is used to measure elevation marks, unevenness amplitude and length, and data conversion into integral indicators in accordance with the requirements.

The difference between these methods lies in measuring the amplitude and length of irregularities, as well as in the work organization, preparation for measurements and their implementation, accuracy and stability of measurement results. Factors affecting the measurement accuracy also fundamentally differ.

Each profilometer requires calibration. Calibration compares the data obtained by the profilometer with the data of short-step geometric leveling, and calculates the scale factor. The scale factor considers all characteristics of vehicles and calibration conditions. When these conditions change during measurements, it is theoretically possible to take into account the changes in the scale factor, but it is difficult in practice.

The main limitation of short-step leveling is its high labor intensity. This method can be used in large volumes when solving the problem of automating the leveling process.

*Research findings:* The proposed device provides short-step leveling in the automatic mode at a step of 5 to 15 cm and measurement accuracy of height increments of 1 mm. The curvimeter "Rovnost" is used for flatness measurements. External factors do not have a significant effect on the measurement accuracy of the "Rovnost" curvimeter.

**Keywords:** road pavement, longitudinal flatness, measurement methods, profilometer

**For citation:** Shcherbakov V.V., Akimov S.S., Kovaleva O.V Longitudinal Flatness of Road Pavements Measured with Profilometer and Universal Curvimeter "Rovnost". Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 256–267. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-256-267. EDN: XKIJU

В настоящее время обеспечению высокого качества покрытий автомобильных дорог при их строительстве и ремонте стало уделяться значительное внимание. Для оценки качества при приемке в эксплуатацию дорог измеряются и оцениваются многие параметры. Показатель «продольная ровность» является одним из наиболее важных диагностических показателей, определяющих качество выполненных работ, безопасность и удобство движения, а также прочностной ресурс дорожного покрытия [1–3].

Продольная ровность дорожных покрытий может определяться различными методами и приборами, позволяющими проводить прямые (метод амплитуд, 3-метровая рейка с клиновидным промерником) или косвенные (дорожный профилометр и др. [4]) измерения и, соответственно, получать объективную или интегральную оценку ровности [5].

Однако в настоящее время в связи с изменениями, внесенными в СП 78.13330.2012<sup>1</sup> в 2021 г. (исключение нормативов по допустимым значениям амплитуд неровностей), требования к продольной ровности покрытия автомобильной дороги в основном сводятся к обеспечению международного показателя ровности *IRI*. Данный показатель характеризуется как отношение величины суммарного перемещения неподрессоренной массы (колеса) относительно поддрессоренной (кузова автомобиля) к длине участка дороги. В этой ситуации дорожные профилометры являются основным методом определения продольной ровности покрытия автомобильных дорог.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ особенностей определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог профилометрами и методом амплитуд, реализованным при помощи универсального дорожного курвиметра «Ровность».

Методы определения продольной ровности дорожных покрытий с применением профилометров принципиально отличаются от методов, в основе которых лежит нивелирование (использование высотных отметок). Отличия между данными методами заключаются как в самих способах измерений амплитуд и длин неровностей, так и в организации работ, подготовке к измерениям и непо-

<sup>1</sup> СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги: утвержден и введен в действие приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 272: дата введения 2013-07-01 / подготовлен Департаментом архитектуры, строительства и градостроительной политики. URL: [https://www.admkrsk.ru/citytoday/municipal/Documents/Adresa\\_pereplanirovok/%D0%A1%D0%9F.78.13330.2012.pdf](https://www.admkrsk.ru/citytoday/municipal/Documents/Adresa_pereplanirovok/%D0%A1%D0%9F.78.13330.2012.pdf) (дата обращения: 21.02.2025).

средственным их выполнении, точности и стабильности результатов измерений по показателям, характеризующим продольную ровность. Кроме того, принципиально отличаются и факторы, влияющие на точность измерений. Поэтому для анализа рассматриваемых способов измерений, обработки данных, качества оценки результатов определения продольной ровности необходимо рассмотреть детально устройство, принцип работы различных приборов и факторы, влияющие на точность измерений и оценки показателя продольной ровности.

Продольная ровность профилометрами определяется по ГОСТ 33101–2014<sup>2</sup>. В нем данный метод описывается как новый подход к определению продольной ровности. Результатом метода является продольный микропрофиль дорожного покрытия. Полученный микропрофиль позволяет при использовании программных средств, известных алгоритмов и массива данных вычислить просветы под трехметровой рейкой, модуль разности вертикальных отметок (по методу амплитуд) и международный показатель ровности *IRI* [6].

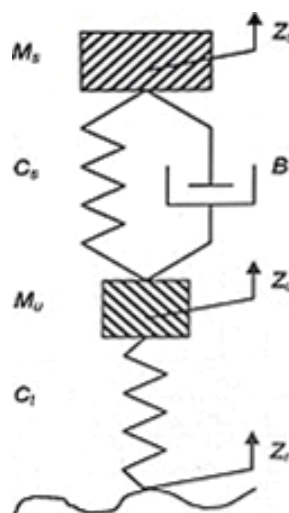
Для того чтобы выполнить полноценный анализ, рассмотрим модель, которая используется для измерений и расчета показателя *IRI*. Устройство для измерения микропрофиля покрытия автомобильной дороги и расчета показателя *IRI* – это блок модели автомобиля, представляющий собой систему, состоящую из колеса, неподрессоренной и поддрессоренной масс, упруго соединенных между собой при помощи пружин или рессор и амортизатора (рис. 1).

Рис. 1. Модель устройства для измерения микропрофиля и расчета *IRI*:

$C_t$  – колесо с заданной жесткостью шины;  $M_u$  – неподрессоренная масса;  $M_s$  – поддрессоренная масса;  $C_s$  – упругий элемент подвески (пружины или рессоры) с заданной жесткостью;  $B$  – гасящий элемент (амортизатор) с заданным коэффициентом вязкого трения;  $Z_r$  – высотная отметка покрытия автомобильной дороги;  $Z_s$  – вертикальная координата поддрессоренной массы;  $Z_u$  – вертикальная координата неподрессоренной массы

Fig. 1. Schematic of measuring device for *IRI* microprofile and calculation:

$C_t$  – wheel with a specified tyre stiffness;  $M_u$  – unsprung part;  $M_s$  – sprung part;  $C_s$  – elastic suspension element (springs or leaf springs) with specified stiffness;  $B$  – damping element (shock absorber) with a specified coefficient of viscous friction;  $Z_r$  – elevation mark of the road surface;  $Z_s$  – vertical coordinate of sprung part;  $Z_u$  – vertical coordinate of unsprung part



Принципиальная схема измерений неровностей дорожных покрытий прибором для контроля ровности и скользкости дорожных покрытий (ПКРС)

<sup>2</sup> ГОСТ 33101–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 ноября 2015 г. № 1931-ст: введен впервые: дата введения 2016-08-01 / подготовлен Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ), Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 418 «Дорожное хозяйство». Стандартиформ, 2016. 23 с.

или толчкометром аналогична приведенной на рис. 1. При этом факторы, влияющие на точность измерений продольной ровности ПКРС или толчкометром, не отличаются от факторов, влияющих на точность определения *IRI* при вычислении интегрального значения вертикальных перемещений неподрессоренной массы с метрической размерностью (см/км). Существуют функциональные зависимости показателя продольной ровности *IRI* от результатов, полученных толчкометром и 3-метровой рейкой, приведенные в ОС-617-р<sup>3</sup>:

$$E(IRI) = 1,65 + 0,08P + 0,0005P^2, \quad (1)$$

где  $E(IRI)$  – оценка ровности участка по *IRI*, м/км;  $P$  – количество просветов под 3-метровой рейкой, превышающих величину 3 мм. Эта величина выражается в процентах от общего количества просветов, полученных при измерении 3-метровой рейкой на выбранном участке.

Факторы, влияющие на точность измерений толчкометром, ПКРС и *IRI*, в научной литературе представлены в работах [7, 8].

Для сравнительного анализа влияния различных факторов на измерения микропрофиля рассмотрим более детально принцип измерения превышений (вертикальной координаты) профилометрами. В качестве датчиков для измерения разности высотных отметок (превышений) поддрессоренной массы  $Z_s$  и высотных отметок покрытия автомобильной дороги  $Z_r$  (приращений высоты  $\Delta Z$ ) (рис. 1) используются энкодеры, датчики линейных перемещений, акселерометры, инерциальные системы. Датчики обеспечивают «шаг» измерения приращений (линейная величина) в зависимости от требований и конструкции в диапазоне 0,01–10 мм, поэтому при определении величины неровностей (изменение вертикальной координаты) обеспечивается требуемая точность измерений  $\Delta Z$  косвенно по данным измерения ускорения или непосредственно приращение вертикальных перемещений, например, энкодером.

В профилометрах применяются акселерометры, которые обеспечивают за счет двойного интегрирования вертикальных ускорений и соответствующей обработки (фильтрация) данных определение линейных вертикальных перемещений, при этом точность зависит (при использовании акселерометров) от времени, что влияет на определение амплитуды при увеличении длин неровностей. Для того чтобы от измеренных величин перейти к метрическим данным микропрофиля, необходимо для каждого профилометра, установленного на автомобиль, выполнять калибровку, а для расширения диапазона измерений калибровку выполнять на нескольких эталонных участках.

Сущность калибровки заключается в следующем: приращения высотных отметок, полученные с помощью профилометра, сравниваются с данными высокоточного короткошагового геометрического нивелирования (с шагом 0,125 и 0,25 м), выполненного в соответствии с нормативными требованиями. На основе этого сравнения производится расчет масштабного коэффициента, а также оцениваются точность, повторяемость и другие метрологические характеристики прибора. Определение масштабного коэффициента выполняется индивидуально

<sup>3</sup> Руководство по оценке ровности дорожных покрытий толчкометром: утверждено и введено в действие Росавтодором от 17 июля 2002 г. № ОС-617-р. // МЕГАНОРМ: [сайт]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294846/4294846115.htm> (дата обращения: 27.10.2024).

для каждого автомобиля. На величину масштабного коэффициента  $m_0$  влияют: точность и «шаг» геометрического нивелирования, скорость движения по эталонному участку  $V_0$ , температура  $T_0$ , профиль дороги (продольные уклоны) участка дороги  $i_0$ , распределение масс в автомобиле  $M_0$ . Таким образом, масштабный коэффициент позволяет учесть все индивидуальные особенности автомобиля, условия калибровки, скорость, уклоны, распределение масс в автомобиле, фактор температуры окружающего воздуха и особенности работы фильтра при обработке статистических данных за счет использования нескольких участков.

При натурных измерениях продольной ровности профилометрами с учетом приведенного влияние оказывают изменения параметров, при которых определялся масштабный коэффициент  $m_0$  на эталонном участке. Например, изменение температуры влияет на жесткость пружин и жесткость шины, а изменение жесткости влияет на амплитуду поддрессоренной и неподдрессоренной масс при вертикальных перемещениях и, соответственно, на измерение приращений высотных отметок  $\Delta Z$ .

Масштабный коэффициент в любой  $i$ -й точке будет зависеть от разности текущих значений параметров и значений этих же параметров в момент калибровки. Итоговый масштабный коэффициент  $m_i$  в любой  $i$ -й точке складывается из составляющих функциональных зависимостей  $f$  различных факторов, влияющих на результат измерения вертикальной координаты (приращения высотных отметок):

$$m_i = m_0 [f(\Delta V) + f(\Delta T) + f(\Delta i) + f(\Delta M)]. \quad (2)$$

Ошибка измерений амплитуды неровности  $\delta_i$ , мм, в любой  $i$ -й точке будет составлять величину

$$\delta_i = (m_i - m_0) \Delta Z_i, \quad (3)$$

где  $m_i$  – текущий масштабный коэффициент;  $\Delta Z_i$  – текущее значение приращения высотных отметок, мм.

Учесть изменения масштабного коэффициента  $m_i$  возможно аналитически, зная функциональные зависимости, а практически, с учетом влияния нескольких факторов одновременно, сложно. В ГОСТ 33101–2014 существуют ограничения только на отклонение скорости от паспортного значения, другие факторы не учитываются. При этом выдержать скорость движения в заданном диапазоне (например, 50 км/ч) в городских условиях и при интенсивном движении сложно, поэтому даже параметры, регламентированные в нормативных требованиях, оказывают негативное влияние на точность измерений [9].

Корректировать данные, измеренные профилометром, возможно при наличии текущих значений температуры, продольных уклонов, перераспределения массы автомобиля, скорости движения, что значительно усложняет измерительную систему, калибровку профилометров и непосредственно измерения. Результаты исследований [3, 4] подтверждают полученные выводы. Изменения показателя продольной ровности увеличиваются с течением времени при нескольких циклах измерений одного и того же участка автомобильной дороги, а в отдельных циклах точность не соответствует паспортным значениям и существенно их превышает, например, если внешние условия измерений отличаются от эталонных, при которых выполнялась калибровка.

Учитывая, что в качестве эталонного метода для калибровки профилометров используется короткошаговое нивелирование, логично представить, что данный метод является не эталонным средством для калибровки, а основным (вместо профилометров). В этом случае при определении продольной ровности параметры автомобиля, температура, продольный профиль и другие факторы на результат измерений влиять не будут. Кроме того, при короткошаговом нивелировании измеряемые значения (приращения высот, линейная координата) используются непосредственно так же, как и в методе амплитуд, для расчета показателя ровности. При этом исключается фильтрация, процесс, который обеспечивает определение параметров с какими-либо ограничениями в заданном диапазоне и, соответственно, с погрешностями, характерными только для конкретного фильтра.

Короткошаговое нивелирование широко применяется в геодезии при строительстве технологических линий, мониторинге сложного технологического оборудования, контроле подкрановых путей. Основным ограничением для широкого применения короткошагового нивелирования на автомобильных дорогах является высокая трудоемкость при выполнении измерений, исключающая возможность его практического применения в больших объемах на автомобильных дорогах. Кроме того, при измерении и обработке данных также требуется высокая квалификация геодезистов. Поэтому для создания эталонных участков, ограниченных по длине, такой способ, несмотря на высокую трудоемкость, применяется, т. к. нет альтернативы по точности данному методу при создании эталонных участков для калибровки профилометров.

Для возможности применения короткошагового нивелирования при определении показателя ровности дорожного покрытия необходимо исключить большую трудоемкость за счет автоматизации процесса нивелирования. Использование метода амплитуд для расчета показателя продольной ровности по данным короткошагового нивелирования позволит сохранить все преимущества этого метода, высокую точность и достоверность данных, а короткий шаг съемки (0,125; 0,25 м) обеспечит высокий уровень детализации. Так, привязка данных (величина амплитуды, начало и конец неровности) может быть выполнена в любой точке в линейной системе координат, исключается влияние внешних факторов на точность измерений, сложный процесс калибровки и влияние режима измерений. Таким образом, автоматизация короткошагового нивелирования может обеспечить эффективное использование данного метода для определения продольной ровности при выполнении исполнительных съемок и диагностике.

В СГУПС разработано аналогичное устройство [10], программное обеспечение и методика измерений, обеспечивающие короткошаговое нивелирование с шагом 5–15 см (в зависимости от конструкции ходовой тележки) с точностью измерения приращений высот 1 мм. Устройство включает подвижный объект (ходовую тележку), волоконно-оптический или механический гироскоп (в зависимости от конструкции), датчик пути и компьютер (рис. 2). Разработка выполнена на базе известных в геодезии измерительных систем, в основе которых лежит принцип механического (автоматизированного) нивелирования, включающий измерение высотных отметок прибором, установленным на автомобиль или специальные тележки, позволяющий полностью автоматизировать определение высотных отметок и их привязку в линейной системе координат.

В основе современных автоматизированных приборов лежит измерение продольного угла наклона подвижного объекта и приращения пути (расстояния) одометром, расчет приращения высот и их интегрирование. Применяются современные цифровые инклинометры, гироскопические и инерциальные системы, а также компьютеры и микроконтроллеры. Схема реализации таких систем в общем виде приведена на рис. 2 [10].

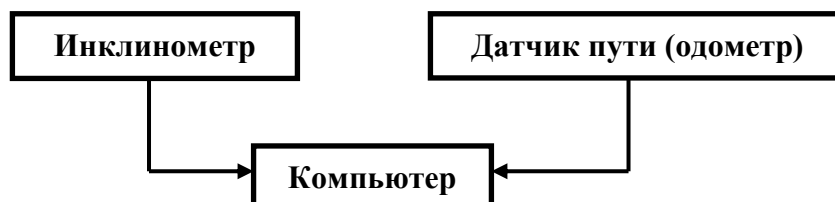


Рис. 2. Блок-схема устройства для определения продольной ровности короткошаговым нивелированием

Fig. 2. Block diagram of a device for measuring longitudinal flatness using short-step levelling

Сущность определения превышений в данных системах заключается в измерении продольного угла  $\gamma$  и единичного приращения пути  $\Delta L$ , которые являются исходными для расчета текущего превышения  $h_i$ :

$$h_i = \sum_{i=1}^n \sin \gamma \Delta L, \quad (4)$$

где  $n$  — количество приращений пути;  $i$  — номер точки, для которой определяется превышение;  $\Delta L$  — единичное приращение пути, мм;  $\gamma$  — текущий продольный угол наклона тележки, град.

Таким образом, формируется массив высотных отметок (приращений высот  $h_i$ ) с шагом 5 или 15 см в зависимости от типа измерительного средства с линейной привязкой к координате пути, который при обработке данных обеспечивает широкий спектр решения инженерных задач, включая определение продольной ровности.

Амплитуды неровности  $\delta_i$ , мм, для каждого измерительного интервала  $L$  рассчитывают по известной формуле

$$\delta_i = \left| \frac{h_{i-k} + h_{i+k}}{2} - h_i \pm \Delta_i \right|, \quad (5)$$

где  $h_{i-k}$ ,  $h_{i+k}$  — условные превышения начальной и конечной точек заданного измерительного интервала  $L$ , м;  $h_i$  — псевдопревышение точки, для которой определяют амплитуду неровности, м;  $\Delta_i$  — поправка, учитывающая кривизну дороги, при наличии вертикальной кривой с известным радиусом, мм.

Значение  $\Delta_i$  определяется по формуле

$$\Delta_i = \frac{L^2}{8R}, \quad (6)$$

где  $L$  — длина измерительного интервала пути (10, 20, 40 м) для расчета поправки, мм;  $R$  — радиус вертикальной кривой (величина, известная из проекта или измеренная с использованием высотных отметок, например, приемником ГНСС), мм.

Программное обеспечение позволяет выполнить расчет показателя ровности по высотным отметкам (метод амплитуд) для измерительной базы 10, 20 и 40 м в соответствии с ГОСТ Р 56925–2016<sup>4</sup>, а также выполнить расчет по высотным отметкам значений амплитуд неровностей с учетом требований для измерения рейкой дорожной и *IRI* в соответствии с ГОСТ Р 59120–2021<sup>5</sup> и ГОСТ 33220–2015<sup>6</sup>.

На рис. 3 приведены варианты реализации систем механического (автоматизированного) короткошагового нивелирования для различных условий измерения и особенностей применения на автомобильных дорогах и аэропортах (УДК «Ровность»).

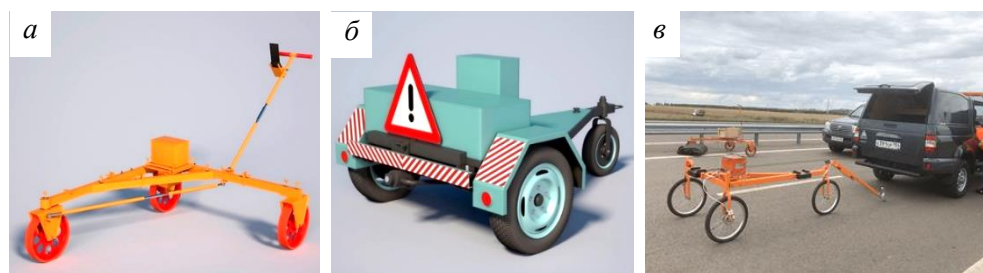


Рис. 3. Модель УДК «Ровность»:

*а* – ручной привод на закрытых для движения участках дорог с оптоволоконным гироскопом; *б* – прицепной модуль с механическим гироскопом; *в* – прицепной модуль-трансформер с оптоволоконным гироскопом

Fig. 3. 'Rovnost' profilometer:

*a* – manual drive on road sections closed to traffic with fiber optic gyroscope; *b* – trailer module with mechanical gyroscope; *c* – trailer transformer module with fiber optic gyroscope

На рис. 4 показано главное окно оператора с результатами оценки продольной ровности.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 56925–2016. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 мая 2016 г. № 370-ст: введен впервые: дата введения 2016-10-01 / подготовлен Научно-исследовательским институтом ЗАО «Союздорнии» // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: [https://kontrol04.ru/upload/2023/03/5\\_20221207-gost-r-56925-2016-nacionalnyj-standart-rossijskoj-federaci.pdf](https://kontrol04.ru/upload/2023/03/5_20221207-gost-r-56925-2016-nacionalnyj-standart-rossijskoj-federaci.pdf) (дата обращения: 21.02.2025).

<sup>5</sup> ГОСТ Р 59120–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 марта 2021 г. № 121-ст: введен впервые: дата введения 2021-05-01 / подготовлен Федеральным автономным учреждением «Российский дорожный научно-исследовательский институт» Министерства транспорта Российской Федерации // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: [https://www.mos.ru/upload/documents/files/2804/GOSTR59120-2021DorogiautomobilnicobshegopolzovaniyaDorojnayaodej\\_.pdf](https://www.mos.ru/upload/documents/files/2804/GOSTR59120-2021DorogiautomobilnicobshegopolzovaniyaDorojnayaodej_.pdf) (дата обращения: 21.02.2025).

<sup>6</sup> ГОСТ 33220–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к эксплуатационному состоянию: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 августа 2015 г. № 1122-ст: дата введения 2015-12-01 / подготовлен Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский дорожный научно-исследовательский институт» Министерства транспорта Российской Федерации. URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/6435/GOST33220-2015.pdf> (дата обращения: 21.02.2025).



| Результат                                                          |                          |                    |       |           |             |          |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------|-----------|-------------|----------|
| ?                                                                  | Шаг определения ровности | 5 м                | 10 м  | 20 м      | Интервал, м | Рейка, % |
| Всего измерений                                                    |                          | 38893              | 38799 | 38565     | 0-100       | 0.0      |
| Количество измерений меньше (равно) допустимого                    |                          | 38849              | 38523 | 38060     | 100-200     | 0.0      |
|                                                                    |                          | 99.9%              | 99.3% | 98.7%     | 200-300     | 0.0      |
| Количество измерений превышающих допуск                            |                          | 44                 | 276   | 505       | 300-400     | 1.0      |
|                                                                    |                          | 0.1%               | 0.7%  | 1.3%      | 400-500     | 0.0      |
|                                                                    |                          |                    |       |           | 500-600     | 3.0      |
|                                                                    |                          |                    |       |           | 600-700     | 3.0      |
| Количество измерений не превышающих 1,5 допуск                     |                          | 44                 | 276   | 490       | 700-800     | 1.5      |
|                                                                    |                          | 0.1%               | 0.7%  | 1.3%      | 800-900     | 0.0      |
| Количество измерений свыше 1,5 допуса                              |                          | 0                  | 0     | 15        | 900-1000    | 0.0      |
|                                                                    |                          | 0.0%               | 0.0%  | 0.0%      | 1000-1100   | 3.5      |
| Максимальное отклонение в мм.                                      |                          | 6мм                | 10мм  | 24мм      | 1100-1200   | 6.0      |
|                                                                    |                          | по методу амплитуд |       | по рейке  | по ИРИ      |          |
| <b>ВЫВОД:</b>                                                      |                          | <b>НЕТ</b>         |       | <b>ДА</b> | <b>ДА</b>   |          |
| (Соответствие проверяемого участка дороги требованиям ГОСТ и СНиП) |                          |                    |       |           |             |          |
|                                                                    |                          | Экспорт            |       | Печать    | OK          |          |

Рис. 4. Результаты измерений и оценки показателя «ровность»

Fig. 4. Measurement and assessment results of pavement flatness

В соответствии с ГОСТ Р 56925–2016 расстояние на измерительном интервале  $i - (i - 1)$  составляет 5 м, высотные отметки в соответствии с нормативными требованиями определяются через каждые 5 м, а расчет амплитуд выполняется для измерительной базы 10, 20 и 40 м. По данным массива высотных отметок (превышений) определяется количество просветов под 3-метровой рейкой и международный показатель ровности *IRI*.

### Выводы

При сравнительном анализе особенностей определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог дорожным профилометром и универсальным дорожным курвиметром «Ровность» необходимо отметить следующее:

- прибор УДК «Ровность» обеспечивает измерение высотных отметок, определение амплитуд неровностей, длин неровностей с преобразованием данных в интегральные показатели с единицами измерения (мм/м, см/км), просветы под 3-метровой дорожной рейкой;

- на точность измерения УДК «Ровность» не оказывают существенного влияния внешние факторы (изменение скорости движения, изменение массы автомобиля, температура, продольный профиль и др.);

- работа с УДК «Ровность» не требует трудоемких процессов по созданию эталонных базисов с использованием геометрического нивелирования, калибровки, а также различных по настройкам фильтров;

- применение УДК «Ровность», включающего в себя оптоволоконные или лазерные гироскопы, обеспечивает высокую точность измерения превышений и, соответственно, амплитуд и длин неровностей, сопоставимую с геометрическим короткошаговым нивелированием;

- УДК «Ровность» может применяться для создания эталонных участков при калибровке профилометров дорожных передвижных лабораторий вместо геометрического нивелирования;

– скорость движения при определении показателя продольной ровности профилометром составляет 50 км/ч, при использовании УДК «Ровность» – 25 км/ч при транспортировке прибора автомобилем и 3 км/ч при ручном при-  
воде при транспортировке человеком;

– погрешность измерения УДК «Ровность» – менее 1 %.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пегин П.А., Капский Д.В., Буртыль Ю.В.* Разработка методики оценки продольной ровности дорожного покрытия при изменении прочности дорожных конструкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 4. С. 37–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-37-47. EDN: UDGHUJ
2. *Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шамраев Л.Г.* Современный подход к оценке транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог государственной компании «Российские автомобильные дороги» // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 1 (6). С. 38–51. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.7. EDN: XAMXGZ
3. *Маданбеков Н.Ж., Абышев Т.Б.* Совершенствование методов определения ровности дорожных одежд в условиях Кыргызской Республики // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 10 (30). С. 72–78. EDN: ZRYLQB
4. *Середович В.А., Алтынцев М.А., Егоров А.К.* Определение индекса ровности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22. № 3. С. 33–44. EDN: ZHICHF
5. *Щербаков В.В., Акимов С.С., Ефимов Н.В.* Приборы для определения ровности покрытия на автомобильных дорогах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 1. № 1. С. 184–190. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-184-190. EDN: GMLCEW
6. *Корневский В.В., Кнышов А.А., Мордик Е.А.* Оптимизация методов диагностики и оценки технического состояния автомобильных дорог // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. № 9. С. 198–202. DOI: 10.23672/SAE.2019.9.36819. EDN: UNIIUV
7. *Щербаков В.В., Конкин А.В., Щербаков И.В., Ковалева О.В.* Средства и методы измерения ровности покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2021. № 1 (45). С. 61–74. EDN: UVQSAA
8. *Щербаков В.В., Акимов С.С.* Совершенствование метода измерения продольной ровности покрытий автомобильных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 106–114. DOI: 10.52170/1815-9265\_2024\_69\_106. EDN: TNDCPN
9. *Уроков А.Х.* Анализ результатов ровности дорожного покрытия, полученных на различных устройствах // Молодой ученый. 2023. № 21 (468). С. 109–111. EDN: SRKDXR
10. *Патент № 2820228 С1* Российская Федерация, МПК G01C 7/04, E01C 23/01. Устройство для определения ровности покрытия автомобильных дорог : № 2023127396 : заявл. 23.10.2023 : опубл. 31.05.2024 / Щербаков В.В., Щербаков И.В., Бунцев И.А., Акимов С.С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения». 12 с. EDN: WIAJVC

#### REFERENCES

1. *Pegin P.A., Kapskiy D.V., Burtyl Yu.V.* Development of Assessment Methodology for Pavement Longitudinal Flatness at Different Durability of Road Structures. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2022; 4: 37–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-37-47. EDN: UDGHUJ (In Russian)
2. *Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shamraev L.G.* A Modern Approach to Assessing Transport and Road Operation of the State Company "Russian Roads". *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog*. 2016; 1 (6): 38–51. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.7. EDN: XAMXGZ (In Russian)
3. *Madanbekov N.Zh., Abyshv T.B.* Improvement of Measuring Road Pavements Flatness in the Kyrgyz Republic. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2017; (10 (30)): 72–78. EDN: ZRYLQB (In Russian)

4. Sereдович V.A., Altyntsev M.A., Egorov A.K. Determination of Road Surface Flatness Index Based on Mobile Laser Scanning Data. *Vestnik of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2017; 22 (3): 33–44. EDN: ZHICHF (In Russian)
5. Shcherbakov V.V., Akimov S.S., Efimov N.V. Devices for Road Surface Flatness Measurement. *Interesko Geo-Sibir'*. 2023; 1(1): 184–190. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-184-190. EDN: GMLCEW (In Russian)
6. Korenevsky V.V., Knyshov A.A., Mordik E.A. Optimization of Diagnostic and Assessment Methods of Road Technical Conditions. *Gumanitarnye, sotsial'no-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki*. 2019; 9: 198–202. DOI: 10.23672 / SAE.2019.9.36819. EDN: UNIIUV (In Russian)
7. Shcherbakov V.V., Konkin A.V., Shcherbakov I.V., Kovaleva O.V. Modern Instruments and Methods for Measuring Road Pavement Flatness. *Dorogi i mosty*. 2021; 1(45): 61–74. EDN: UVQSAA (In Russian)
8. Shcherbakov V.V., Akimov S.S. Improving Measuring Method of Longitudinal Flatness of Road Surfaces. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2024; 2 (69): 106–114. DOI: 10.52170/1815-9265\_2024\_69\_106. EDN: TNDCPN (In Russian)
9. Urokov A.Kh. Measurement Results of Road Pavement Flatness Obtained by Various Devices. *Molodoi uchenyi*. 2023; 21 (468): 109–111. EDN: SRKDXR (In Russian)
10. Shcherbakov V.V., Shcherbakov I.V., Buntsev I.A., Akimov S.S. “Device for Road Flatness Measurement”. Patent Russ. Fed. No. 2820228. 2024. 23 p. (In Russian)

#### Сведения об авторах

Щербakov Владимир Васильевич, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, vvs@stu.ru

Акимов Сергей Сергеевич, инженер-технолог, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, ak\_s\_s@mail.ru

Ковалева Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, kov@stu.ru

#### Authors Details

Vladimir V. Shcherbakov, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, vvs@stu.ru

Sergei S. Akimov, Industrial Engineer, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, ak\_s\_s@mail.ru

Olga V. Kovaleva, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, kov@stu.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 24.02.2025  
Одобрена после рецензирования 08.04.2025  
Принята к публикации 21.04.2025

Submitted for publication 24.02.2025  
Approved after review 08.04.2025  
Accepted for publication 21.04.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 268–278.

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 (5): 268–278.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.8+667.621.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278

EDN: YUXNQF

## **АСФАЛЬТЕНОГЕНЕЗ В БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИХ СТАРЕНИЯ**

**Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич**  
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Все более актуальной становится проблема замедления старения асфальтобетонных дорожных покрытий, поскольку именно их состояние определяет межремонтные сроки и долговечность автомобильных дорог.

Органические вяжущие в битумоминеральных композициях (БМК) начинают подвергаться старению уже на стадии их изготовления. Этот процесс происходит на протяжении всего жизненного цикла асфальтобетона. Сложные физико-химические превращения происходят в первую очередь в адсорбционно-сольватных пленках битума на поверхности зерен минеральных материалов. Идут процессы дальнейшей полимеризации компонентов нефтяного вяжущего, сопровождающиеся увеличением их молекулярных масс в последовательности: масла → смолы → асфальтены. Повышение концентрации асфальтенов предложено называть асфальтеногенезом. Этот термин означает уменьшение содержания низкомолекулярных и увеличение высокомолекулярных фракций; рост вязкости битумных пленок, повышение их хрупкости при отрицательных температурах и, как следствие, усиление трещинообразования, разрушение дорожной одежды еще до наступления установленных нормативами сроков службы.

*Целью* работы являлось исследование процессов старения БМК во временном континуме под влиянием природно-климатических факторов путем контроля содержания асфальтенов в материале конструктивного слоя. Поскольку асфальтены являются практически стопроцентным концентратом парамагнитных центров, интенсивность асфальтеногенеза можно оценивать по изменениям концентрации парамагнитных центров. Таким образом, концентрация парамагнитных центров в БМК может выступать в качестве косвенного показателя степени старения БМК.

*Материалы и методы* исследования. В качестве минеральных компонентов использовались гранит и известняк. Вяжущим веществом служил битум марки БНД 90/130, а роль дисперсной арматуры играли полиамидные волокна, адсорбат – сырая нефть Первомайского месторождения (Томская обл.). Изменения концентрации парамагнитных центров в образцах БМК оценивались методом ЭПР на приборе RADIOPAN SE/X-25-44 с рубиновыми стержнями.

*Результаты.* В работе развита идея оценивания степени асфальтеногенеза по количеству парамагнитных центров в БМК. Обоснована возможность модифицирования поверхности минеральных материалов в процессе приготовления БМК путем введения в их состав полимерной дисперсной арматуры из отрезков обработанных химических волокон, пропитанных нефтепродуктами. Предложенное техническое решение позволяет снизить интенсивность асфальтеногенеза, а следовательно, и старение битумоминеральных композиций.

**Ключевые слова:** битумоминеральная смесь, асфальтогенез, адсорбция, метод ЭПР, полимерно-дисперсное армирование, битум, старение асфальтобетона, модифицирование

**Для цитирования:** Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Асфальтогенез в битумоминеральных композициях как показатель их старения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 268–278. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278. EDN: YUXNQF

## ORIGINAL ARTICLE

## ASPHALTENE GENESIS IN BITUMEN-MINERAL COMPOSITIONS AS AGEING INDICATOR

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich

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

**Abstract.** The problem of reducing the aging intensity of asphalt concrete pavements, which determines periods between repairs and road durability, is becoming increasingly urgent. Organic binders in bitumen-mineral compositions (BMC) start ageing already during their manufacture. This process occurs throughout the entire life cycle of asphalt concrete. Complex physicochemical transformations occur first of all, in adsorption-solvation films of bitumen on the grain surface of mineral materials. Further polymerization of oil binder components is accompanied by an increase in their molecular weight in the following order: oils → resins → asphaltenes. It is proposed to call the increase in the asphaltene concentration asphaltene genesis. This term means a decrease in the content of low-molecular fractions and an increase in high-molecular fractions; growth in viscosity of bitumen films, increase in their brittleness at negative temperatures and, as a consequence, increase in the crack formation, destruction of road surface even before the service life established by standards. It is proposed to estimate the degree of asphaltene by the quantity of paramagnetic centers in BMC.

**Purpose:** The aim of the work is to study the BMC ageing under the influence of natural and climatic factors by control the content of asphaltenes in the structural layer. Since asphaltenes are one hundred percent concentrate of paramagnetic centers, the intensity of the asphaltene formation can be estimated by changes in the concentration of paramagnetic centers. Thus, the concentration of paramagnetic centers in the BMC can act as an indirect indicator of BMC aging.

**Methodology/approach:** Granite and limestone were used as mineral components. BND 90/130 bitumen served as a binder, while polyamide fibres acted as dispersed reinforcement and crude oil from the Pervomaisky field (Tomsk Region) served as an adsorbate. Changes in the concentration of paramagnetic centres in BMC samples were evaluated using the EPR method on a RADIOPAN SE/X-25-44 device with ruby rods.

**Research findings:** The surface modification of mineral materials is shown during the BMC preparation by an introduction of polymer dispersed reinforcement in the BMC composition from sections of processed chemical fibers impregnated with oil products. The proposed solution allows decreasing the intensity of asphaltene formation, and, consequently, aging of bitumen-mineral compositions.

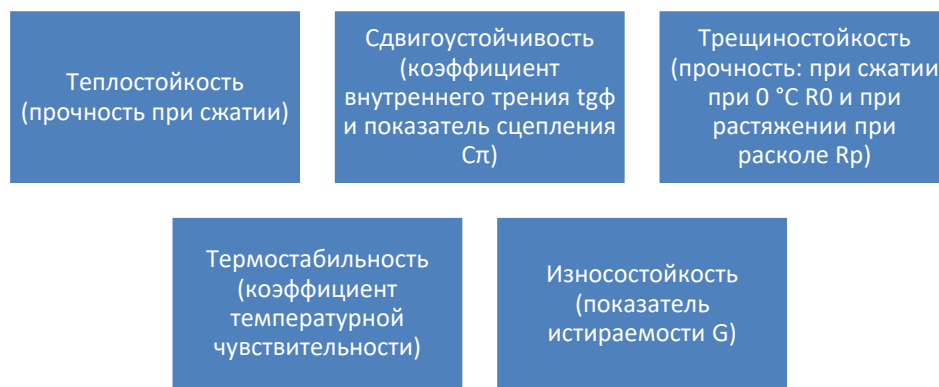
**Keywords:** bitumen-mineral mixture, asphaltene, adsorption, polymer-dispersed reinforcement, bitumen, asphalt concrete aging, modification

**For citation:** Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Asphaltene Genesis in Bitumen-Mineral Compositions as Ageing Indicator. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 268–278. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278. EDN: YUXNQF

Широкое использование в дорожном строительстве битумоминеральных композиций (БМК) связано с такими их характеристиками, как технологичность получения, функциональность устройства конструктивных слоев дорожных одежд, в дальнейшем – простота ремонта и содержания. Поскольку в качестве органических вяжущих, используемых для получения БМК, применяются битумы, основные недостатки БМК предопределены свойствами битумов. Их термопластичность обуславливает низкую сдвигоустойчивость дорожного покрытия при высоких температурах. В результате появляются волны, гребенки, колеи, а также иные виды дефектов, вплоть до глубоких разрушений конструктивного слоя.

Указанные деформации связаны с процессами, протекающими в адсорбционно-сольватных оболочках битума. Повышенные температуры делают их эластичными, плохо сопротивляющимися нагрузкам, что приводит к росту сдвиговых деформаций конструктивного слоя из БМК. Низкие зимние температуры вызывают снижение эластичности пленок битума в адсорбционно-сольватных оболочках, что обуславливает формирование трещин.

На рисунке схематично показаны основные свойства БМК, являющиеся ключевыми в обеспечении долговечности дорожных покрытий, непосредственно связанные с процессами, протекающими в адсорбционно-сольватных оболочках битума.



Основные свойства БМК  
Main properties of BMS

Старение БМК является результатом целого ряда физико-химических процессов, среди которых первые позиции занимают избирательная фильтрация органических веществ на стадии получения БМК и трансформирование компонентов БМК под влиянием климатических условий, природных явлений, техногенных воздействий при эксплуатации автомобильной дороги. Как показано в работах [1–3], для битумоминеральных композиций одной из основных форм старения нефтяного битума являются изменения соотношения компонентов битума в приповерхностных слоях.

На интенсивность процесса старения оказывают влияние следующие факторы: испарение легкой фракции мальтеновой части нефтяного битума,

кислород воздуха, температура конструктивного слоя. Также очень важным фактором является процесс фракционирования компонентов битума (избирательная фильтрация), который начинается при обработке минеральных материалов битумом и сопровождает весь жизненный цикл конструктивного слоя. При избирательной фильтрации во внутреннее пространство (тонкие поры) минерального материала проникают масла, у поверхности распределены смолы, непосредственно на поверхности – асфальтены. В результате избирательной фильтрации адсорбционно-сольватные оболочки битума обедняются низкомолекулярными фракциями, что ускоряет старение битумоминеральных композиций. Адсорбция в данном случае имеет необратимый характер. Указанные процессы проявляются в структурных изменениях состава битума. Старение масел сопровождается преобразованием их в смолы, которые, в свою очередь, превращаются в асфальтены [4–7]. Эти процессы ускоряются в присутствии содержащихся в минеральных порошках полутонких оксидов –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , играющих роль катализаторов, что показано в работах [8–11].

Процесс увеличения концентрации асфальтенов в нефтяном битуме при его старении предложено назвать термином «асфальтогенез». Под этим термином будем понимать совокупность существенных изменений в качественном и количественном составе компонентов нефтяного битума: снижение концентрации низкомолекулярных фракций (масел и смол) и рост высокомолекулярных фракций (асфальтенов). Ранее подобные физико-химические превращения были описаны исследователями в работах [12–22]. Трансформации, происходящие в составе нефтяного битума, приводят к ухудшению реологических и прочностных свойств битумоминеральных композиций. Увеличивается относительное удлинение при разрыве, растут прочность и модуль упругости. Достигнув максимальных значений в среднем за 10-летний период, эти показатели падают. Авторами [23, 24] установлено, что при старении битумоминеральных композиций при различных температурах концентрация асфальтенов может значительно возрастать (до 40 %), что подтверждает протекание асфальтогенеза в его активной фазе.

Когезионные связи между зернами минерального материала обеспечивают образующиеся на их поверхности адсорбционно-сольватные оболочки битума. Потеря низкомолекулярных фракций влечет утрату эластичности, приводит к хрупкости БМК, особенно при низких температурах, интенсивному трещинообразованию и преждевременному разрушению дорожных одежд.

Приведенные выше аргументы и результаты исследований свидетельствуют о том, что для снижения скорости и интенсивности разрушения дорожных одежд из асфальтобетона с использованием БМК необходимо:

- подавлять избирательную фильтрацию компонентов битума;
- уменьшать интенсивность асфальтогенеза;
- ингибировать реакции старения битума, протекающие при участии оксидов железа и алюминия.

Решить поставленные задачи и одновременно улучшить реологические характеристики, повысить показатели физико-механических свойств конструктивных слоев из битумоминеральных композиций возможно путем их дисперсного армирования, описанного ранее в наших работах.

Для снижения стоимости дисперсно-армированных битумоминеральных композиций перспективно применять в качестве дисперсной арматуры химические волокна, полученные путем резки промышленных отходов – волокнистых сорбентов (матов, заградительных бонов и т. д.), отработавших свой ресурс. Такие отходы содержат регулируемое количество собранного углеводородного сырья, разлитого при авариях [25–31]. При их использовании возникает возможность реализации «двухстадийной технологии обработки минеральных материалов двумя типами органических вяжущих», описанной в работе [32].

На первой стадии в минеральный материал следует вводить органическое вяжущее, характеризующееся высокими показателями адгезии. На второй стадии полученная смесь обрабатывается вяжущим с высокими когезионными свойствами. Поэтому при приготовлении битумоминеральных композиций в минеральный материал следует вводить сначала (первая стадия) волокна дисперсной арматуры, содержащие регулируемое количество собранного углеводородного сырья. Углеводородное сырье (нефть, мазут, смолы сланцевые и каменноугольные, различного происхождения фусы, пасты и т. д.) отличается высокими адгезионными свойствами и химической активностью, поскольку содержат большое количество поверхностно-активных веществ (фенолы, кетоны, карбоновые кислоты и т. д.). Вступая в химическое взаимодействие с поверхностью минеральных материалов, эти вещества создают устойчивые хемосорбционные связи. Этот процесс сопровождается коагуляцией пор и капилляров минеральных материалов с модифицированием всех поверхностей. Коагуляция снижает (либо совсем предотвращает) фракционирование и избирательную фильтрацию компонентов нефтяного битума. Активно взаимодействуя с поверхностью минеральных материалов, поверхностно-активные вещества нейтрализуют полутонкие оксиды, что не позволит им выполнять роль катализаторов старения нефтяных битумов.

На второй стадии приготовления смесь минеральных материалов с волокнами дисперсной арматуры, ранее адсорбировавшей углеводороды, соединяется с дозированным количеством нефтяного битума. При этом не происходит избирательная фильтрация с фракционированием компонентов битума. Это объясняется имевшим место на предыдущей стадии заполнением органических пор и капилляров минерального материала. Содержание асфальтенов в верхнем адсорбционном слое поверхности частиц минеральных материалов, покрытых битумом, не будет повышаться, свидетельствуя о том, что интенсивность асфальтеногенеза (за счет фракционирования) снижается. Снижается также интенсивность асфальтеногенеза за счет уменьшения скорости превращения смол в асфальтены, а масел – в смолы. Поскольку оксиды железа и алюминия при взаимодействии с органическими материалами, содержащимися в дисперсной арматуре, уже нейтрализованы как катализаторы старения, их отрицательное влияние на нефтяной битум будет минимальным. В результате на поверхности каждой частицы минерального материала происходит наложение и совместное влияние на свойства БМК адсорбционно-сольватных оболочек двух типов вяжущих. Первый слой (сформировавшийся в результате контакта минеральных материалов с жидкими углеводородами, поглощенными частицами дисперсной арматуры), обеспечивающий хорошую



адгезионную способность, снижает интенсивность избирательной фильтрации компонентов битума. Второй слой представлен собственно нефтяным битумом. Этот слой более водостойкий. Он дает хорошую когезионную связь между частицами минерального материала.

Протекающие таким образом процессы структурообразования в БМК подавляют асфальтогенез. Происходящее повышение содержания низкомолекулярных фракций в приповерхностных слоях нефтяного битума приводит к лучшей их эластичности в холодное время года и, как следствие, к снижению трещинообразования верхнего слоя дорожной одежды. Повышение трещиностойкости обеспечивает также содержащаяся в конструктивном слое дисперсная арматура. Кроме того, пространственная армирующая решетка из дисперсной арматуры повышает сдвигустойчивость материала в летний период, когда конструктивный слой нагревается до температуры 50–60 °С. В целом комплекс вышеуказанных процессов структурообразования БМК увеличивает долговечность асфальтобетонных покрытий. Контроль над изменением концентрации парамагнитных центров в битумоминеральных композициях позволяет делать выводы об интенсивности асфальтогенеза как индикатора старения БМК.

Это подтверждено экспериментально методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Основанием для применения этого метода являлись результаты исследований, свидетельствующие о том, что в асфальтенах сконцентрирована большая часть парамагнитных центров [34–36].

В ходе экспериментальных работ исследовались минеральные материалы кислых и карбонатных пород. Кислые породы были представлены гранитом, а карбонатные – известняком. Исследовались смеси этих пород с нефтяным битумом как образец традиционной технологии приготовления БМК и смеси, созданные путем обработки указанных пород сначала сырой нефтью, а затем нефтяным битумом, как пример двухстадийной технологии приготовления БМК дисперсно-армированными волокнами, полученными путем резки отработанных сорбентов, содержащих регулируемое количество собранной при разливе сырой нефти [31]. В исследованиях использовался нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130 Ачинского НПЗ и сырая нефть Первомайского месторождения Томской области, полученная после центрифугирования дисперсной арматуры из отработанных волокнистых сорбентов. Были приготовлены две группы образцов. Первая группа исследовалась методом ЭПР сразу после смешивания органических и минеральных материалов. Вторая группа исследовалась после того, как материалы были подвергнуты старению в течение шести часов в термостабилизированной камере. Таким образом, смеси подвергались процедуре старения, а затем определялась концентрация в них парамагнитных центров как показателей старения БМК.

Изменения концентрации парамагнитных центров в образцах БМК исследовались по методике, описанной в работе [32].

Результаты исследований интенсивности старения битумоминеральных композиций, оказывающей влияние на изменение концентрации парамагнитных центров в битумоминеральных композициях (асфальтогенез), представлены в таблице.

**Влияние процессов старения битумоминеральных композиций  
на изменение в них количества парамагнитных центров  
BMC ageing effect on the quantity of paramagnetic centers**

| №<br>п/п | Состав органоминеральной смеси и технология<br>ее производства | Концентрация парамагнитных<br>центров в смеси, г <sup>-1</sup> |                                              |
|----------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|          |                                                                | До<br>старения                                                 | После<br>старения                            |
| 1        | Гранит + битум (одностадийная технология)                      | 0,22·10 <sup>17</sup>                                          | 0,7·10 <sup>17</sup>                         |
| 2        | Гранит + нефть + битум (двухстадийная<br>технология)           | 0,19·10 <sup>17</sup><br>Снижение<br>на 14 %                   | 0,26·10 <sup>17</sup><br>Снижение<br>на 63 % |
| 3        | Известняк + битум (одностадийная технология)                   | 3,6·10 <sup>17</sup>                                           | 6,4·10 <sup>17</sup>                         |
| 4        | Известняк + нефть + битум (двухстадийная<br>технология)        | 0,4·10 <sup>17</sup><br>Снижение<br>на 89 %                    | 4,7·10 <sup>17</sup><br>Снижение<br>на 26 %  |

Как видно из данных таблицы, физико-химические процессы, протекающие при старении БМК, сопровождаются повышением концентрации парамагнитных центров и интенсификации асфальтогенеза. При этом концентрация парамагнитных центров в смеси битума с гранитом увеличилась в 3,18 раза, а в смеси битума с известняком – только в 1,8 раза. Применение двухстадийной технологии приготовления битумоминеральных композиций позволяет снизить концентрацию парамагнитных центров в смесях с кислыми породами минеральных материалов на 63 %, а в смеси с карбонатными породами – на 26 %. Но при этом изначально, уже на стадии приготовления битумоминеральных композиций, видно, что концентрация парамагнитных центров в смесях с карбонатными породами в 16 раз выше, чем в смесях с кислыми породами. Это можно объяснить тем, что гранит является более плотной породой и процессы избирательной фильтрации компонентов битума в его поры и капилляры происходят менее интенсивно, чем в поры и капилляры известняка, являющегося более пористой породой. Эти результаты соответствуют результатам исследований, выполненных под руководством Н.А. Готовой [22] и профессора Ф.Г. Унгера [35], в которых доказано, что при большем исходном содержании асфальтенов в битуме интенсивность изменения его химического состава при старении меньше.

Таким образом, исследования, выполненные с применением ЭПР, свидетельствуют, что интенсивность асфальтогенеза, коррелирующая с концентрацией парамагнитных центров, является индикатором старения БМК. Изучение интенсивности избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов и особенностей влияния полуторных оксидов на интенсивность старения БМК комплексом современных физико-химических методов – задача дальнейших исследований.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.

2. Гезенцевей Л.Б., Колбанев И.В., Рвачева Э.М. Механо-химические процессы в битумоминеральных системах // Автомобильные дороги. 1971. № 2. С. 6–9.
3. Бабаев В.И. Старение асфальтобетона в условиях юга России // Автомобильные дороги. 1994. № 3. С. 21.
4. Бахрах Г.С. Оценка термоокислительной стабильности асфальтовых материалов с учетом роли контактных взаимодействий // Труды Союздорнии. 1975. Вып. 79. С. 132–140.
5. Давыдова А.Р., Гладырь С.А., Телкова Т.Н. Исследование изменений, протекающих в битумах при их глубоком окислении // Труды Союздорнии. 1977. Вып. 100. С. 4–12.
6. Давыдова А.Р. Исследование процесса старения битума под влиянием различных факторов // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 48–54.
7. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. Москва : Транспорт, 1983. 383 с.
8. Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭЦ. Москва : Энергоиздат, 1985. 285 с.
9. Методические рекомендации по технологии применения в асфальтобетоне отвалных золошлаковых смесей теплоэлектростанций. Москва : СоюздорНИИ, 1978. 23 с.
10. Чистяков Б.З., Лялинов А.Н. Использование минеральных отходов промышленности. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1984. 150 с.
11. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification // Advances in Colloid and Interface Science. 2009. V. 145 (1–2). P. 42–82.
12. Farcas F. Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes // Laboratoire Central des Ponts et Chausses. 1996.
13. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art // Transportation Research Board 999. 1984. P. 13–30. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70285-7
14. Petersen J. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships // Transportation Research E-Circular (Vol. 1). Transportation Research Board. Washington, DC, 2009. 68 p.
15. Siddiqui M.N., Ali M.F. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts Siddiqui // Fuel. 1999. V. 78 (9). P. 1005–1015.
16. Siddiqui M.N., Ali M.F. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt // Fuel. 1999. V. 78 (12). P. 1407–1416.
17. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. I. Oxygen absorption behaviors and kinetics // Petroleum Science and Technology. 2003. V. 21 (1). P. 283–299.
18. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. Chemical group composition and structure changes // Petroleum Science and Technology. 2004. V. 22 (3). P. 263–274.
19. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. III. Average molecular structure parameter changes // Petroleum Science and Technology. 2004. V. 22 (3). P. 275–286.
20. Reyes F.A., Daza C.E., Rondón H.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column // Revista EIA. 2012. V. 17. P. 47–56.
21. Глотова Н.А., Горишков В.С., Кац Б.И. Изменение реологических свойств и химического состава битумов при старении // Химия и технология топлив и масел. 1980. № 4. С. 47–49.
22. Слободчиков Ю.В. Исследование влияния условий эксплуатации на надежность битумоминеральных покрытий автомобильных дорог Северного Казахстана : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1972. 32 с.
23. Mohammed A.A., Morshed K. The effect of ageing on physical and chemical properties of asphalt cement // Iraqi journal of chemical and petroleum engineering. 2008. V. 9. № 2. P. 9–15.
24. Пиеничных О.А., Скорик Д.С. Опыт применения дисперсно-армированных асфальтобетон в дорожном строительстве // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 141. С. 121–127.
25. Алиахван А., Калгин Ю.И. Улучшение структурно-механических свойств теплового асфальтобетона методом полимерно-дисперсного армирования // Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. 2021. Вып. 61. С. 53–61.

26. Пиеничных О.А. Деформационно-прочностные характеристики дисперсно-армированных асфальтобетонов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 143. С. 41–44.
27. Мерзлякин А.Е., Гамеляк И.П. Испытания конструкций дорожных одежд для оценки эффективности применения дисперсно-армированного асфальтобетона // Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд // Труды Союздорнии. 1990. С. 17–25.
28. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report // Transp. Res. Rec. 1983. № 916. P. 6–18.
29. Tessoneau H. Revêtement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisieme Voie Macon nord // Revue generale des Routes et des Aerodromes. 1988. V. 62. № 650. P. 77–78.
30. Pinaud Y., Hintzi J., Poirier J., Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans // Revue generale des Routes et des Aerodromes. 1988. № 649. P. 61–64.
31. Лукашевич В. Увеличения срока службы асфальтобетонных покрытий за счет двухстадийного введения органических вяжущих в процессе производства асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. № 1. С. 24–25.
32. Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокишин Р.И. Применение электронного парамагнитного резонанса для исследования процессов старения органического вяжущего в дисперсно-армированных основаниях дорожных одежд // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 179–189. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-179-189
33. Флоровская В.Н., Овчинникова Л.И. Люминесцентная микроскопия битуминозных веществ. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 80 с.
34. Верти Дж., Болтон Дж. Теория и практика применения метода ЭПР : пер. с англ. Москва : Мир, 1975. 368 с.
35. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. Новосибирск : Сибирская издательская фирма РАН «Наука», 1995. 192 с.
36. Железко Е.П., Печеный Б.Г. О кинетике образования и рекомбинации свободных радикалов в битумах // Труды Союздорнии. 1970. Вып. 46. С. 137–142.

## REFERENCE

1. Gezentsvei L.B., Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. Asphalt Concrete for Roads. 2nd edn. Moscow: Transport, 1985. 350 p. (In Russian)
2. Gezentsvei L.B., Kolbanev I.V., Rvacheva E.M. Mechanochemical Processes in Bitumen-Mineral Systems. *Avtomobil'nye dorogi*. 1971; (2): 6–9. (In Russian)
3. Babaev V.I. Ageing of Asphalt Concrete in Southern Russia. *Avtomobil'nye dorogi*. 1994; (3): 21. (In Russian)
4. Bakhrakh G.S. Assessment of Thermal-Oxidative Stability of Asphalt Materials with Regard to Contact Interactions. *Trudy Soyuzdornii*. 1975; (79): 132–140. (In Russian)
5. Davydova A.R., Gladys' S.A., Telkova T.N. Changes in Bitumen During Deep Oxidation. *Trudy Soyuzdornii*. 1977; (100): 4–12. (In Russian)
6. Davydova A.R. Ageing Process of Bitumen under the Influence of Various Factors. *Trudy Soyuzdornii*. 1971; (44): 48–54. (In Russian)
7. Grushko I.M., Korolev I.V., Borshch I.M., Mishchenko G.M. Road Construction Materials. Moscow: Transport, 1983. 383 p. (In Russian)
8. Melent'ev V.A. Composition and Properties of Ash and Slag from Thermal Power Plants. Moscow: Energoizdat, 1985. 285 p. (In Russian)
9. Methodological Recommendations on using Ash and Slag Mixtures from Thermal Power Plants in Asphalt Concrete. Moscow: SoyuzdorNII, 1978. 23 p. (In Russian)
10. Chistyakov B.Z., Lyalinov A.N. Use of Industrial Mineral Waste. Leningrad: Stroiizdat, Leningradskoe otdelenie, 1984. 150 p. (In Russian)
11. Lesueur D. The colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009; 145 (1–2): 42–82.
12. Farcas F. Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 1996.

13. Petersen J. Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art. Transportation Research Board, Washington, DC, 1984. Pp. 13–30.
14. Petersen J. A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships. Transportation Research E-Circular, Vol. 1. Transportation Research Board. 2009.
15. Siddiqui M.N., Ali M.F. Studies on the Aging Behavior of the Arabian Asphalts Siddiqui. *Fuel*. 1999; 78 (9): 1005–1015.
16. Siddiqui M.N., Ali M.F. Investigation of Chemical Transformations by NMR and GPC during the Laboratory Aging of Arabian Asphalt. *Fuel*. 1999; 78 (12): 1407–1416.
17. Qi Y., Wang F. Study and Evaluation of Aging Performance of Petroleum Asphalts and their Constituents during Oxygen Absorption. I. Oxygen Absorption Behaviors and Kinetics. *Petroleum Science and Technology*. 2003; 21 (1): 283–299.
18. Qi Y., Wang F. Study and Evaluation of Aging Performance of Petroleum Asphalts and their Constituents during Oxygen Absorption. II. Chemical Group Composition and Structure Changes. *Petroleum Science and Technology*. 2004; 22 (3): 263–274.
19. Qi Y., Wang F. Study and Evaluation of Aging Performance of Petroleum Asphalts and their Constituents During Oxygen Absorption. III. Average Molecular Structure Parameter Changes. *Petroleum Science and Technology*. 2004; 22 (3): 275–286.
20. Reyes F.A., Daza C.E., Rondón H.A. Determination of SARA Fractions of Environmentally Aged Colombian Asphalts using Liquid Chromatography Column. *Revista EIA*. 2012; (17): 47–56.
21. Glotova N.A., Gorshkov V.S., Kats B.I. Changes in Rheological Properties and Chemical Composition of Bitumen during Ageing. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1980; (4): 47–49. (In Russian)
22. Slobodchikov Yu.V. Influence of Operating Conditions on the Reliability of Bituminous Mineral Coatings of Motor Roads in Northern Kazakhstan. PhD Abstract. Moscow, 1972. 32 p. (In Russian)
23. Mohammed A.A., Morshed K. The effect of Ageing on Physical and Chemical Properties of Asphalt Cement. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2008; 9 (2): 9–15.
24. Pshenichnykh O.A., Skorik D.S. Experience in Using Dispersion-Reinforced Asphalt Concrete in Road Construction. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020; (141): 121–127. (In Russian)
25. Alshakhvan A., Kalgin Yu.I. Improvement of Structural and Mechanical Properties of Warm Asphalt Concrete by Polymer-Disperse Reinforcement. *Proektirovanie i stroitel'stvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonnelei*. 2021; (61): 53–61. (In Russian)
26. Pshenichnykh O.A. Deformation and Strength Properties of Dispersion-Reinforced Asphalt Concrete. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020; (143): 41–44. (In Russian)
27. Merzlikin A.E., Gamelyak I.P. Testing of Road Pavement Structures to Assess the Effectiveness of Dispersed Reinforced Asphalt Concrete. In: Design, calculation and testing of road pavements. *Trudy Soyuzdornii*. 1990; 17–25. (In Russian)
28. Smith R.D. Laboratory Testing of Fabric Interlayer for Asphalt Concrete Paving: Interim Report. *Transportation Research Record*. 1983; (916): 6–18.
29. Tessoneau H. Revêtement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisième Voie Macon nord. *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988; 62 (650): 77–78.
30. Pinaud Y, Hintzi J, Poirier J, Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans. *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988; (649): 61–64.
31. Lukashevich V.N. Service Life Increase of Asphalt Pavements by Two-Stage Introduction of Organic Binders in Asphalt Concrete Production. *Stromaitel'nye terialy*. 2003; (1): 24–25. (In Russian)
32. Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Electron Paramagnetic Resonance in Organic Binder Aging in Dispersely Reinforced Substructures. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (6): 179–189. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-179-189 (In Russian)
33. Florovskaya V.N., Ovchinnikova L.I. Fluorescent Microscopy of Bituminous Substances. Moscow: Moscow University Press, 1970. 80 p. (In Russian)
34. Wertz J., Bolton J. Theory and Practice of the EPR Method. Moscow: Mir, 1975. 368 p. (Russian translation)

35. Unger F.G., Andreeva L.N. Fundamental Aspects of Petroleum Chemistry. The Nature of Resins and Asphaltenes. Novosibirsk: Nauka, 1995. 192 p. (In Russian)
36. Zhelezo E.P., Pecheny B.G. On the Kinetics of Formation and Recombination of Free Radicals in Bitumen. *Trudy Soyuzdornii*. 1970; (46): 137–142.35. (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 05.09.2025  
Одобрена после рецензирования 09.09.2025  
Принята к публикации 10.09.2025

Submitted for publication 05.09.2025  
Approved after review 09.09.2025  
Accepted for publication 10.09.2025

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 5. С. 279–290.

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 (5): 279–290.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7/.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-279-290

EDN: ZMRLKA

## **К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С УЧЁТОМ ТРЕБУЕМОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ**

**Диана Юрьевна Кириллова, Николай Алексеевич Ермошин**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы обеспечения надежности и экономичности дорожных конструкций на этапах проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оптимизации соотношения надежности и экономичности с учетом ограниченности ресурсов и требований к качеству автомобильных дорог.

**Цель работы** – разработать подход к проектированию дорожных одежд, обеспечивающий заданный уровень надежности при минимальных затратах.

В качестве **метода** используется вероятностный подход, который учитывает случайный характер коэффициента прочности и анализирует его влияние на эксплуатационные характеристики, включая скорость движения транспортных средств. Представлена зависимость между ровностью покрытия, прочностью конструкции и обеспечиваемой скоростью движения. Предложена математическая модель, позволяющая определить оптимальные конструктивные параметры дорожной одежды на основе минимизации приведенных затрат при обеспечении заданной надежности.

**Результаты** исследования обосновывают выбор проектных решений с учетом эксплуатационных характеристик и экономической эффективности. Сделан вывод о необходимости интеграции оценки надежности и затрат на всех стадиях жизненного цикла автомобильной дороги для повышения эффективности дорожного строительства и эксплуатации.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, надежность, экономичность, дорожные конструкции, прочность, скорость движения, оптимизация

**Для цитирования:** Кириллова Д.Ю., Ермошин Н.А. К вопросу обеспечения надёжного проектирования автомобильных дорог с учётом требуемой работоспособности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 279–290. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-279-290. EDN: ZMRLKA

## ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS RELIABLE DESIGN OF ROAD PAVEMENTS  
WITH REQUIRED EFFICIENCY

Diana Yu. Kirillova, Nikolai A. Ermoshin

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia*

**Abstract.** The article addresses the reliability and cost-effectiveness of road pavements during their design, construction, and operation. The relevance of the study is due to the need to optimize the balance between reliability and economy under resource constraints and quality requirements for roads.

**Purpose:** The aim of this work is to develop a design approach for flexible pavements that ensures a specified level of reliability with minimum costs.

**Methodology:** The probabilistic method takes into account a random nature of the pavement strength coefficient and its influence on operational characteristics, including travel speed.

**Research findings:** A relationship is established between pavement evenness, structural strength, and resulting travel speed. A mathematical model is proposed to determine the best pavement parameters based on minimizing life-cycle costs while maintaining the required level of reliability.

**Practical implications:** The obtained results prove the selected design solutions considering both operational performance and economic efficiency.

**Value:** The importance of integrating reliability assessment and cost analysis is emphasized for all stages of the road life cycle to improve the overall efficiency of the road construction and maintenance.

**Keywords:** automobile road, reliability, cost-effectiveness, pavement, strength, travel speed, optimization

**For citation:** Kirillova D.Yu., Ermoshin N.A. Towards Reliable Design of Road Pavements with Required Efficiency. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 279–290. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-279-290. EDN: ZMRLKA

## Введение

Определяющим показателем качества автомобильных дорог является их надежность. Выполнение требований к надежности конструктивных элементов дорожных конструкций и дорожных сооружений обеспечивает функционирование автомобильных дорог с заданными показателями эффективности, безопасности, экологичности и другими характеристиками их качества. Важнейшие показатели надежности автомобильных дорог: безотказность, долговечность и ремонтопригодность. Требуемые значения показателей надежности обеспечиваются конструктивными, технологическими и эксплуатационными способами на стадии проектирования, строительства и содержания дорог. В зависимости от необходимого уровня надежности дорожных конструкций на стадии их проектирования определяются конструктивные параметры, виды и свойства применяемых дорожно-строительных материалов, технологии строительства.

В ходе строительства важным условием обеспечения надежности являются стабильность и точность технологических процессов, а также физико-механические характеристики дорожно-строительных материалов. На стадии эксплуатации необходимо обеспечить своевременное выполнение работ по содер-



жанию автомобильной дороги на основе типовых моделей эксплуатации, разработанной и действующей нормативно-технической документации.

Необходимо отметить, что для автомобильной дороги как технической системы, характеризующейся изнашиванием и старением (рис. 1), при проектировании задаются такие нормативные показатели надежности, как расчетный срок службы дорожной конструкции и расчетный уровень надежности. Однако обеспечение требуемого уровня надежности дорожных конструкций ограничивается условиями финансирования или выделяемыми ресурсами на строительство и эксплуатацию дорожных сооружений. Чем большую надежность автомобильной дороги хотят получить, тем выше затраты на строительство. При меньшей надежности затраты на строительство снижаются, однако возрастают эксплуатационные затраты на более частые и в большинстве своем дорогостоящие ремонты. В связи с этим актуальной является задача разработки методов оптимизации соотношения надежности и экономичности объектов дорожного строительства. Сущность этой задачи сводится к выбору наилучшего варианта дорожной конструкции по комплексному критерию надежности при ограничениях на затраты.

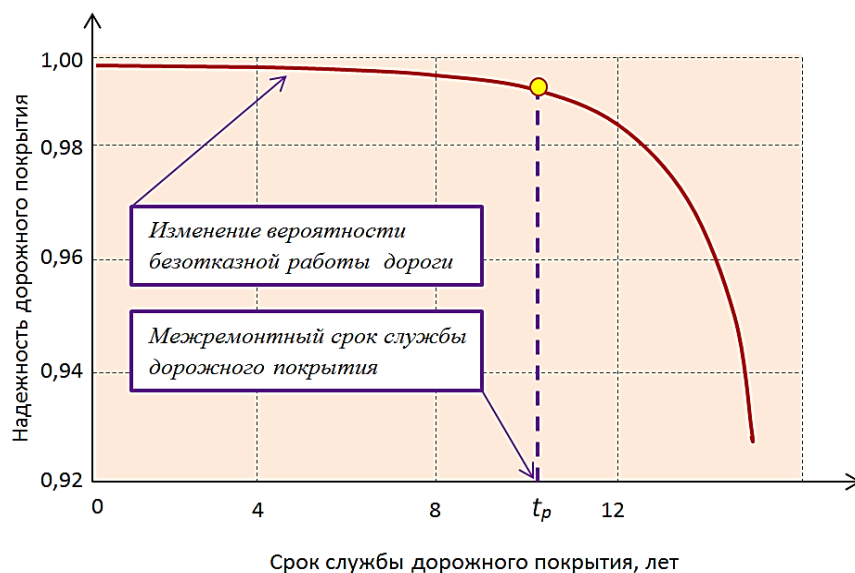


Рис. 1. Динамика надежности работы дорожного покрытия нежесткого типа [1]

Fig. 1. Reliability dynamics of flexible pavement performance [1]

### Основная часть

Если принять, что надежность участка автомобильной дороги – это его способность обеспечивать безопасное движение автомобилей с требуемой расчетной скоростью в течение заданного периода времени и при заданных условиях, то можно определить область допустимых показателей надежности, при которых обеспечивается пропуск требуемого объема движения в заданное время при ограничениях затрат на строительство и эксплуатацию дороги.

Известно, что для проектирования автомобильных дорог с требуемой (оптимальной) надежностью необходимо иметь статистические данные об интенсивности отказов. В большинстве случаев такие данные для конкретных условий эксплуатации отсутствуют. Поэтому состояние конструктивных элементов дорожных сооружений и дорожных конструкций можно характеризовать двумя значениями соответствующего выходного параметра ее надежности. Если выходной параметр находится в допустимых пределах, то дорога выполняет свои функции. В противном случае, т. е. когда значение выходного параметра за допустимыми пределами, возникает отказ.

В соответствии с известными правилами установления критериев отказов и предельных состояний технических систем ГОСТ 27.003–2016 категории отказов должны обеспечивать однозначное понимание состояния автомобильной дороги, простоту обнаружения факта отказа, а также последствия наступления отказа. Этим требованиям в наибольшей степени соответствует обеспечиваемая дорогой средняя скорость движения, являющаяся интегральным показателем ее качества. В таком случае отказом автомобильной дороги можно считать выход средней скорости движения за установленные пределы.

В свою очередь, обеспечиваемая дорогой средняя скорость движения (без учета влияния кривых, уклонов, факторов ненадлежащего содержания) зависит от ровности покрытия, а ровность покрытия – от коэффициента прочности дорожной одежды. Однако коэффициент прочности дорожной одежды является случайной величиной, что обусловлено вероятностной природой физико-механических характеристик дорожно-строительных материалов, модуля упругости земляного полотна, технологической изменчивостью толщин конструктивных слоев дорожной одежды и другими факторами.

Основываясь на результатах ранее выполненных исследований [1–3], можно предположить, что значение величины коэффициента прочности ( $K_n$ ) подчиняется нормальному закону распределения, т. е.

$$f(K_n) = \frac{1}{\sigma_{K_n} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(K_n - \overline{K_n})^2}{2\sigma_{K_n}^2} \right], \quad (1)$$

где  $\overline{K_n}$  – математическое ожидание значения величины коэффициента прочности;  $\sigma_{K_n}$  – среднеквадратическое отклонение значения величины коэффициента прочности.

Принятие этого допущения позволяет получить зависимость для определения вероятности отказа дорожной конструкции в зависимости от обеспечиваемой дорогой средней скорости движения  $\bar{v}$ . Она может быть определена по формуле [3–5]:

$$\bar{v} = \beta e^{-\frac{\alpha t}{K_n}}, \quad (2)$$

где  $\beta$  и  $\alpha$  – коэффициенты, зависящие от типа дорожной конструкции и интенсивности, состава движения;  $t$  – время работы дорожной конструкции, лет.

С учетом вероятностного характера  $K_n$  определение вида функции плотности распределения скорости движения  $\varphi(\bar{v})$  выполняется на основе теории вероятностей с использованием следующей зависимости:

$$\varphi(\bar{v}) = f(\psi(\bar{v}))|\psi'(\bar{v})|. \quad (3)$$

Выполнив преобразование формулы (1) с использованием формул (2) и (3), можно получить функцию плотности распределения  $\bar{v}$ :

$$\varphi(\bar{v}) = \frac{1}{\sigma_{K_n} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{\left( \frac{\alpha t}{\ln\left(\frac{\beta}{\bar{v}}\right)} - \overline{K_n} \right)^2}{2\sigma_{K_n}^2} \right] \left[ \frac{\alpha t}{\bar{v} \ln\left(\frac{\beta}{\bar{v}}\right)^2} \right]. \quad (4)$$

Тогда вероятность безотказной работы дорожной конструкции в течение времени  $t$  определяется следующей зависимостью:

$$R(t) = p(v_d \leq v \leq v_r) = \int_{v_d}^{v_r} \varphi(\bar{v}) d\bar{v}$$

или

$$R(t) = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left[ \frac{\frac{\alpha t}{\ln\left(\frac{\beta}{v_r}\right)} - \overline{K_n}}{\sqrt{2\sigma_{K_n}^2}} \right] - \Phi \left[ \frac{\frac{\alpha t}{\ln\left(\frac{\beta}{v_d}\right)} - \overline{K_n}}{\sqrt{2\sigma_{K_n}^2}} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $v_r$  и  $v_d$  – расчетная и минимально возможная скорости движения по дороге с соответствующим значением коэффициента прочности, при котором требуется проведение ремонта дорожного покрытия;  $t$  – время работы дорожной конструкции, лет.

При этом вероятность отказа автомобильной дороги  $q(t)$ , т. е. выхода величины скорости движения  $v$  за пороговое значение ( $v < v_d$ ), рассчитывается по формуле

$$q(t) = 1 - R(t). \quad (6)$$

В ходе проектирования автомобильных дорог требуется обеспечить оптимальную надежность  $R(t)$  автомобильных дорог с заданной вероятностью  $p(t)$ . Надежность автомобильной дороги по обеспечению скорости движения в диапазоне от  $v_d$  до  $v_r$  зависит от характеристик дорожной одежды и земляного полотна. Так, изменение высоты насыпи и физико-механических характе-

ристик грунтов земляного полотна оказывает влияние на конструктивные параметры дорожной одежды. Модуль упругости дорожной одежды возрастает с увеличением высоты насыпи. Это означает, что затраты на устройство дорожной одежды могут быть снижены посредством возведения более высокой насыпи. Аналогично можно оптимизировать стоимость дорожной одежды за счет рационального подбора толщин и материалов ее слоев. Для каждого из вариантов дорожной конструкции (рис. 2) можно подобрать такое сочетание параметров конструктивных элементов (модулей упругости  $E_i$  и толщин слоев  $h_i$ ), которое обеспечит минимизацию стоимости всей конструкции с учетом достижения ее требуемой надежности по прочности  $K_{\Pi}$ , а следовательно, и обеспечиваемой дорогой скорости движения  $v$ :

$$K_{\Pi} = \frac{E_{\text{э}}}{E_{\text{тр}}}, \quad (7)$$

где  $E_{\text{э}}$  и  $E_{\text{тр}}$  – фактический (эквивалентный) и требуемый модули упругости дорожной конструкции.

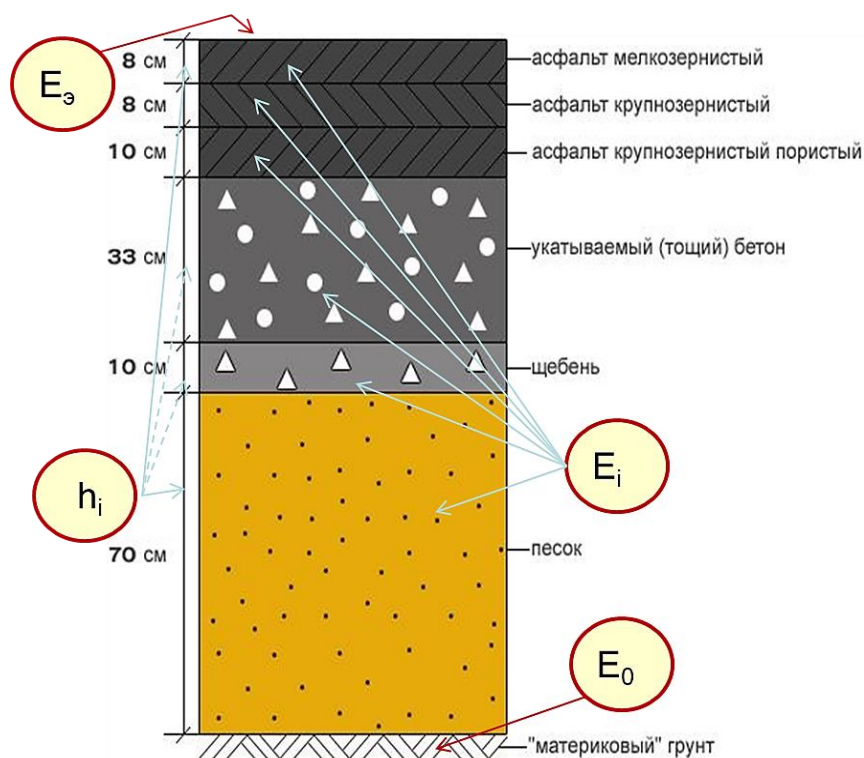


Рис. 2. Вариант дорожной конструкции [2]

Fig. 2. Road pavement structure [2]

При этом за критерий оптимальности соотношения между надежностью и затратами на ее обеспечение можно принять экономически обоснованную ве-

роятность безотказной работы автомобильной дороги по обеспечению скорости движения. Задача экономического обоснования вероятности безотказной работы автомобильной дороги по скорости движения может быть решена исходя из следующих предпосылок [6–9].

Первоначально необходимо определить вид уравнения для суммарных приведенных затрат ( $C_{\text{прив}}$ ) на строительство и эксплуатацию автомобильной дороги (участка). При этом суммарные затраты должны включать стоимость строительства дороги ( $C_{\text{стр}}$ ), потери от дорожно-транспортных происшествий ( $C_{\text{дтп}}$ ), число подверженных отказу  $j$ -го вида  $i$ -го конструктивного элемента ( $j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}$ ), среднюю стоимость устранения отказа  $j$ -го вида для  $i$ -го конструктивного элемента ( $\bar{C}_{ij}$ ), стоимость перевозок по автомобильной дороге ( $C_{\text{пер}}$ ) за срок ее службы. С учетом такой структуры затрат суммарные приведенные затраты можно рассчитать по формуле

$$C_{\text{прив}} = C_{\text{стр}} + C_{\text{дтп}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{C}_{ij} + C_{\text{пер}}. \quad (8)$$

Каждое из слагаемых в формуле (8) в той или иной мере зависит скорости движения  $v$ , т. е.

$$v = f(C_{\text{стр}}, C_{\text{дтп}}, \bar{C}, C_{\text{пер}}). \quad (9)$$

Как уже отмечалось, за показатель надежности автомобильной дороги можно принять обеспечиваемую ей скорость дорожного движения. В соответствии с этим значение скорости должно быть не ниже ее минимально возможной величины  $v_d$  по дороге с соответствующим значением коэффициента прочности  $K_{\text{п}}$ , при дальнейшем снижении которого требуется проведение ремонта дорожного покрытия.

Дополнительно следует пояснить, что при воздействии нагрузки на материал нежестких дорожных покрытий при потере упругости в процессе эксплуатации появляются необратимые деформации, вызывающие неровности покрытия, являющиеся причиной снижения скорости движения транспортных средств. Методологические принципы влияния деформаций покрытия на скорость движения рассмотрены в различных источниках [9–12]. На основе этих исследований выявлены характеристики взаимозависимости ровности и прочности дорожных покрытий:

$$r(t) = \frac{0,5r(t_0)}{\sqrt[3]{0,12K_{\text{п}}}} \exp(0,08t), \quad (10)$$

где  $r(t)$  и  $r(t_0)$  – ровность покрытия на текущий момент времени и начальная ровность покрытия.

Наличие этой зависимости, а также результаты исследований влияния параметров и состояния дороги на скорость движения [4, 5, 12, 13] позволили получить формулу для определения скорости движения в зависимости от ровности и прочности дорожного покрытия:

$$v = \frac{1}{2s} \sqrt{gr(t)^2 (\delta - 1)^2 \frac{p(1 - \bar{\mu}^2) D}{K_{\text{пmin}} E_{\text{тр}}}}, \quad (11)$$

где  $s$  – допустимая необратимая деформация покрытия;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\delta$  – допустимый динамический коэффициент для скорости  $v_r$  (характеризует отношение матожидания модуля относительной скорости подрессоренных и непрессоренных масс расчетной нагрузки к скорости ее движения по ОДМ 218.11.001–2015);  $p$  – статическое давление колеса расчетной нагрузки (автомобиля);  $\bar{\mu}$  – математическое ожидание коэффициента Пуассона дорожной одежды;  $K_{\text{пmin}}$  – минимально допустимое значение коэффициента прочности дорожной одежды;  $D$  – диаметр отпечатка колеса расчетной нагрузки (автомобиля).

Установление взаимосвязи характеристик прочности, ровности дорожного покрытия как одного из основных конструктивных элементов дорожной конструкции и скорости движения по автомобильной дороге позволяет сформулировать математическую постановку задачи оптимизации соотношения прочности и надежности. Суть такой постановки состоит в следующем.

Пусть требуется обеспечить надежность дорожной конструкции  $R(v_d)$  не ниже некоторого минимального значения  $R^*(v_d)$ , при котором автомобильная дорога продолжает выполнять свои функции. Величина  $R^*(v_d)$  может рассматриваться как число или область допустимых значений. Для выполнения мероприятий по обеспечению надежности дорожной конструкции выделяются ограниченные финансовые средства  $C^*(v_d)$ . Требуется определить уровень надежности дорожной конструкции, при котором  $R(v_d) \geq R^*(v_d)$  и  $C(v_d) \leq C^*(v_d)$ .

Решение сформулированной задачи сводится к тому, что изначально назначается несколько вариантов дорожной конструкции и с использованием приведенных зависимостей рассчитывается их надежность. При неудовлетворительной надежности выбираются конструктивные решения (мероприятия) по ее увеличению. При этом для каждого  $i$ -го конструктивного решения (мероприятия) рассчитываются затраты на его реализацию  $\Delta C_i(v_d)$  и приращение надежности  $\Delta R_i(v_d)$ . Среди конкурирующих вариантов конструктивных решений по повышению надежности выбирается вариант, имеющий наибольшее значение отношения  $\Delta R_i(v_d) / \Delta C_i(v_d)$ . Далее расчет надежности дорожной конструкции повторяется с учетом принятого конструктивного решения.

Поскольку в соответствии с зависимостями (7) и (8) приращение надежности имеет стоимостной эквивалент (суммарные приведенные затраты,  $C_{\text{прив}}$ ), а ущерб от отказа дорожной одежды как основного элемента дорожной конструкции соизмерим с затратами на ее устройство, максимальное значение абсолютного эффекта  $\Delta Q_i$  от приращения надежности по  $i$ -му конструктивному решению  $\Delta R_i(v_d)$  можно определить по зависимости

$$\Delta Q_i = C_{\text{прив}} - \Delta C_i(v_d). \quad (12)$$

В случае, когда важно в качестве критерия выбора решения по обеспечению надёжности принимать количество затраченных средств на единицу эффекта  $\Delta Q_i^*$ , расчет выполняется по формуле

$$\Delta Q_i^* = \frac{\Delta R_i(v_d)}{\Delta C_i(v_d)}. \quad (13)$$

После определения варианта конструктивного решения с максимальным эффектом необходимо вновь проверить выполнение ограничения на выделенное финансирование ( $C(v_d) \leq C^*(v_d)$ ). Если ограничение не нарушается, то принимается вариант конструктивного решения с максимальным значением  $\Delta Q_i^*$ . При этом обязательно проверяется выполнение ограничения по обеспечению требуемой надёжности  $R(v_d) \geq R^*(v_d)$ . Невыполнение этого ограничения свидетельствует о необходимости поиска новых вариантов конструкции, обеспечивающих значение надёжности не ниже чем  $R^*(v_d)$ . Отсутствие возможного варианта решения, удовлетворяющего ограничениям по надёжности и стоимости, требует пересмотра исходных данных. В случае соответствия выбранной конструкции ограничениям на стоимость и надёжность принимается решение, обеспечивающее самый высокий уровень надёжности  $R_{\text{опт}}(v_d)$  с учетом выделенного финансирования.

В общем случае зависимость надёжности автомобильной дороги через показатель  $v_d$  от суммарных приведенных затрат ( $C_{\text{прив}}$ ) на ее строительство и эксплуатацию может быть представлена графически (рис. 3).

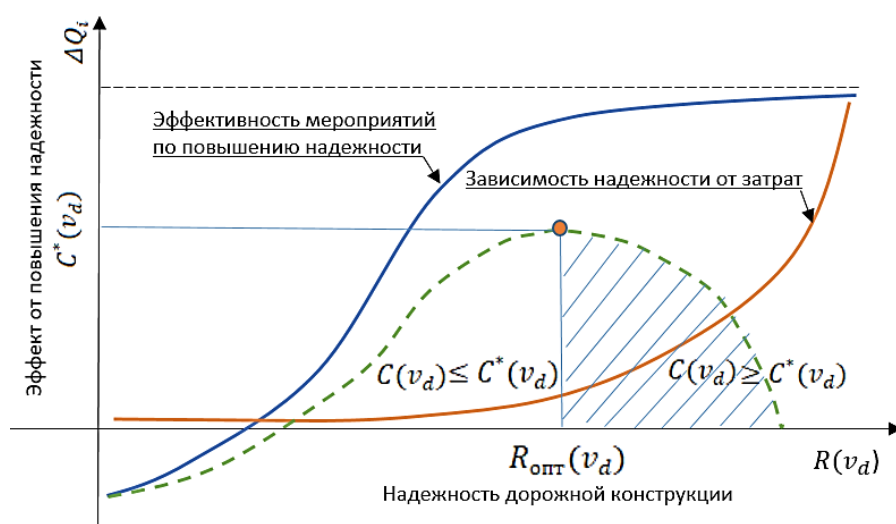


Рис. 3. Взаимосвязь надёжности и экономичности дорожных конструкций  
Fig. 3. Dependences between reliability and cost-effectiveness of road pavement

### Заключение

Результаты теоретических и экспериментальных исследований надежности автомобильных дорог свидетельствуют о том, что надежность дороги определяется выполнением мероприятий по обеспечению прочности и ровности дорожных покрытий. Динамика ровности покрытия за время его эксплуатации зависит от физико-механических характеристик основания дорожной одежды и земляного полотна. Вместе с тем повышение прочности и достижение ровности покрытий посредством устранения их дефектов при минимально допустимом фактическом модуле упругости и формировании значительных деформаций требуют реализации дорогостоящих конструктивных решений. Поэтому надежность дорожных конструкций должна обеспечиваться на стадии их проектирования, а также путем недопущения технологических дефектов на стадии строительства и своевременным выполнением мероприятий в период содержания дороги.

Проектирование автомобильных дорог должно исходить из оптимальной надежности дорожных конструкций, т. е. обеспечения расчетной скорости движения в межремонтный период с заданной вероятностью. Повышение надежности автомобильных дорог при проектировании должно осуществляться на основе опыта их эксплуатации, исключения возможности применения материалов с низкой долговечностью, создания запаса прочности дорожных конструкций с учетом их экономичности. При этом следует руководствоваться принципами рационального распределения затрат по стадиям жизненного цикла автомобильной дороги.

Таковы основные принципы концептуального подхода к определению оптимального соотношения надежности и экономичности конструктивных элементов автомобильных дорог. Дальнейшим направлением исследований в этой области является установление аналитических зависимостей надежности дорожной конструкции от вариантов проектных решений и затрат на их реализацию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермошин Н.А., Громов В.А. Методологические аспекты управления надежностью строительства и эксплуатации автомобильных дорог // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2. С. 27–32. EDN: WEZJLD
2. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путь навигатор. 2022. № 50. С. 30–41. EDN: LNFPMN
3. Ярмолинский В.А., Украинский И.С. Теоретические предпосылки повышения надежности дорожных конструкций с армирующими прослойками из ГМ // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : международный сборник научных трудов. Т. 14. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2014. С. 87–90. EDN: TCBHUF
4. Буртыль Ю.В., Леонович И.И. Взаимозависимости ровности покрытия и прочности дорожной одежды // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2011. № 2. С. 86–92. EDN: JDBSES
5. Буртыль Ю.В., Капский Д.В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности жестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19. № 4. С. 570–583. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583. EDN: MGXUAY
6. Кузнецова О.А., Ермошин Н.А., Царева О.С., Бирюков О.Р. Концептуальный подход к определению оптимального соотношения надежности и экономичности конструктивных



- элементов автомобильных дорог // Неделя науки ИСИ : материалы Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2021 г. В 3 частях. Часть 2. Санкт-Петербург : СПбПУ, 2021. С. 302–305. EDN: PLBBDY
7. Попов Н.А., Осокин Н.А. Совершенствование механизмов управления дорожным обслуживанием в Российской Федерации // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2020. Т. 11. № 3. С. 304–315. DOI: 10.17747/2618-947X-2020-3-304-315. EDN: UUPVBN
  8. Моисеенко Р.П., Ефименко В.Н. К оценке долговечности автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 207–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-207-213. EDN: IPEWWD
  9. Каменчуков А.В. Влияние качества дорожного покрытия на скорость движения // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : международный сборник научных трудов. Т. 17. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2017. С. 192–194. EDN: OTGXJD
  10. Питухин А.В., Петров А.Н. Влияние ровности покрытий на работоспособность автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2010. № 5. С. 71–75. EDN: QYRFPH
  11. Стеценко Д.Б., Rogozina Ю.В., Фотиади А.А. Прогнозирование ровности дорожных одежд // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 г. Часть 9. Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. С. 328–333. EDN: EORUAV
  12. Золотарь И.А., Некрасов В.К., Коновалов С.В., Яковлев Ю.М., Коганзон М.С. Повышение надежности автомобильных дорог. Москва : Транспорт, 1977. 183 с.
  13. Смирнов А.В., Малышев А.А., Агалаков Ю.А. Механика устойчивости и разрушения дорожных конструкций. Омск : СибАДИ, 1997. 91 с.

#### REFERENCES

1. Ermoshin N.A., Gromov V.A. Methodological Aspects of Safety Risk Management in Road Construction and Operation. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016; 2 (55): 27–32. EDN: WEZJLD (In Russian)
2. Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Averyanov D.A. Simulation Modeling of Road Structure Failure Risk During Inter-Repair Period. *Putevoy navigator*. 2022; 50 (76): 30–41. EDN: LNFPHN (In Russian)
3. Yarmolinsky V.A., Ukrainsky I.S. Theoretical Prerequisites for Reliability of Road Pavements with Reinforcing Geosynthetic Interlayers. In: Coll. Papers “Far East. Automobile Roads and Traffic Safety”, Vol. 14, A.I. Yarmolinskii Ed., Khabarovsk, 2014. Pp. 87–90. EDN: TCBHUF (In Russian)
4. Burtyl Yu.V., Leonovich I.I. Interdependencies between Pavement Evenness and Road Pavement Strength. *Trudy BGТУ. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost*. 2011; 2: 86–92. EDN: JDBSES (In Russian)
5. Burtyl Yu.V., Kapsky D.V. Modelling the Relationship of Smoothness and Resistibility in Non-Rigid Pavements based on Theoretical and Practical Studies. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*. 2022; 19 (4): 570–583. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583. EDN: MGXUAY (In Russian)
6. Kuznetsova O.A., Ermoshin N.A., Tsareva O.S., Biryukov O.R. Conceptual approach to determining the optimal ratio of reliability and cost-effectiveness of highway structural elements. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. ‘Science Week at the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University’*, in 3 vol., Saint-Petersburg, 2021. Pp. 302–305. EDN: PLBBDY (In Russian)
7. Popov N.A., Osokin N.A. Improvement of Road Maintenance Management in Russia. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment*. 2020; 11 (3): 304–315. DOI: 10.17747/2618-947X-2020-3-304-315. EDN: UUPVBN (In Russian)
8. Moiseenko R.P., Efimenko V.N. Towards Durability of Automobile Roads. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(3): 207–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-207-213. EDN: IPEWWD (In Russian)

9. Kamenchukov A.V. Influence of Road Surface Quality on Traffic Speed. Coll. Papers "Far East. Automobile Roads and Traffic Safety", Vol. 17, Khabarovsk, 2017. Pp. 192–194. EDN: OTGXJD (In Russian)
10. Pitukhin A.V., Petrov A.N. The Impact of Pavement Smoothness on Road Performance. *Transportnoe delo Rossii*. 2010; 5: 71–75. EDN: QYRFPH (In Russian)
11. Stetsenko D.B., Rogozina Yu.V., Fotiadi A.A. Prediction of Pavement Evenness. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists*. Belgorod, 2022. Pp. 328–333. EDN: EORUAV (In Russian)
12. Zolotar I.A., Nekrasov V.K., Konovalov S.V., Yakovlev Yu.M., Koganzon M.S. Reliability Improvement of Motorways. Moscow: Transport, 1977. 183 p. (In Russian)
13. Smirnov A.V., Malyshev A.A., Agalakov Yu.A.; ed. by Smirnov A.V. Mechanics of Stability and Failure of road Pavements. Omsk, 1997. 91 p. (In Russian)

#### Сведения об авторах

Кириллова Диана Юрьевна, ст. преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, 29, литера Б, kirdiana@mail.ru

Еρμοшин Николай Алексеевич, докт. воен. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, 29, литера Б, ermonata@mail.ru

#### Authors Details

Diana Yu. Kirillova, Senior Lecturer, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, kirdiana@mail.ru

Nikolai A. Ermoshin, DSc, Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, ermoshin\_na@spbstu.ru

#### Вклад авторов

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

#### Authors contributions

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

## ИСПРАВЛЕНИЕ

Исправление ошибки в названии статьи в научно-техническом журнале «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» № 4 – 2025.

Корректные данные: Джавед Сират, Руденко А.А. Оптимизация организационно-производственных структур для повышения эффективности строительных проектов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 172–188. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-172-188. EDN: QLZNNS

Jawed Serat, Rudenko A.A. Optimization of Organizational Structures for Efficiency Improvement of Construction Projects. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 172–188. DOI: 10.31675/ 1607-1859-2025-27-4-172-188. EDN: QLZNNS.