

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

Научное издание

ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА № 1 – 2026
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 20.02.2026. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 21,88. Усл. печ. л. 25,99. Тираж 200 экз. Заказ № 6.

Дата выхода: 27.02.2026.
Цена: свободная.

Адрес редакции/издателя: 634003, Томск, пл. Соляная, 2, тел. (3822) 65-37-61, e-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
Отпечатано в ООП ТГАСУ, Томск, ул. Партизанская, 15

16+

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2026

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL

OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 28

№ 1 2026
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

[illegible]

EDITORIAL STAFF

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

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

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

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

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

Scientific Edition
VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 1 – 2026
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: 20.02.2026. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman. Issue date: 27.02.2026.
Published sheets: 21,88. Conventional printed sheets: 25,99. Print run: 200 copies. Price: free.
Order N 6.

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



© Tomsk State University
of Architecture and Building, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Сахарова С.Е., Ситникова Е.В. Музеи под открытым небом как способ сохранения деревянных церквей на примере музея «Витославицы» в Новгородской области.....	9
Поляков Е.Н., Полякова О.П. Капитолий – административный центр города Чандигарх (Ле Корбюзье, 1950–1960 гг.)	29
Хашими Сайед Вахидулла. Принципы формирования архитектуры школьных зданий нового поколения	47
Аль-Самаветли А.Х.Ш., Скопинцев А.В. Подходы к проектированию объектов экотуризма в водно-болотных угодьях Ирака	57
Колупаева К.И., Литвинова О.Г. Градостроительная концепция института «Гипрогор» для города Ленинска-Кузнецкого (1945–1947 годы): выбор пути развития	70
Вайтенс А.Г., Матвеева А.А. Особенности промышленных и приречных территорий в районе речного вокзала в городе Казани	84
Карелин Д.В., Тырышкина М.С. Эволюция инженерного благоустройства городских улиц Сибирского региона (XX–XXI века)	101
Пономарев Е.С., Спиридонова И.П. Архитектура кинолаборатории в условиях Крайнего Севера	120
Рожкова О.В., Астахова Е.С. Особенности формирования архитектуры высотных зданий с учетом конструктивных систем	134

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Опбул Э.К., Ширунов Г.Н., Калдар-оол А.-Х.Б., Саая С.С. Трещиностойкость и жесткость изгибаемых железобетонных конструкций на основе нелинейной деформационной модели	148
Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Выбор коэффициентов звукопоглощения акустически эффективных материалов при расчете непостоянного во времени шума в помещении	169
Подшивалов И.И. Расчетное обоснование надежности храма во имя Новомучеников и Исповедников российских в городе Томске	181

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Власов М.А., Никулин Н.Ю., Герасимов О.В., Петухов А.А. Влияние ползучести грунта при укреплении оснований фундаментов зданий и сооружений на примере опытной площадки в городе Томске	192
---	-----

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Рафальская Т.А. Влияние температурного перепада в тепловой сети на выбор схемы теплового пункта.....	207
Левин Е.В., Окунев А.Ю. Роль трансмиссионного теплообмена зданий с грунтовыми основаниями в формировании теплового микроклимата помещений в реальных внешних метеорологических условиях	222

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Мохов А.И., Шлычков Д.И., Челоненко А.Г., Кондрашова С.В. Комплексотехнический подход к обеспечению устойчивого развития инфраструктуры жилищно-коммунальных систем на примере эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения и канализации	238
--	-----

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

Картопольцев В.М. К расчету несущих балок пролетных строений мостов трубчатого сечения	249
Сиволап В.Е., Ефименко С.В., Ефименко В.Н., Чурилин В.С., Сухоруков А.В., Галяутдинов З.Р., Башарин А.Д. Оценка достоверности действующих методик определения минимальных расчетных температур верхнего слоя асфальтобетонного покрытия	260

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Саиян С.Г. Концепция несинхронного многоточечного сейсмического воздействия как эквивалента приходящей поверхностной рэлеевской волны	271
Герасимов С.И., Тихомиров В.М., Попов А.М., Егорова А.В., Спиридонов А.А. Моделирование неравномерной осадки оснований каркасных сооружений.....	288

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Sakharova S.E., Sitnikova E.V. Open-Air Museums for Preservation of Wooden Churches: Vitoslavlitsy Museum in the Novgorod Region	9
Polyakov E.N., Polyakova O.P. Capitol – Administrative Center of the City of Chandigarh (Le Corbüzier, 1950–1960).....	29
Hashimi Sayed Wahidullah. Formation Principles of New Generation School Building Architecture	47
Al-Samawetli A.H.Sh., Skopintsev A.V. Design Approaches to Ecotourism Facilities in Iraq Wetlands	57
Kolupaeva K.I., Litvinova O.G. Giprogor Urban Planning Concept for Leninsk-Kuznetsky (1945–1947). A Development Path.....	70
Vaitens A.G., Matveeva A.A. Features of Industrial Territories and Riverside Station in Kazan.....	84
Karelin D.V., Tyryshkina M.S. Engineering Services and Equipment of Streets in the Siberian Region in the 17th and Early 20th Centuries	101
Ponomarev E.S., Spiridonova I.P. Architecture of Motion Picture Laboratories in the Far North.....	120
Rozhkova O.V., Astakhova E.S. High-Rise Building Architecture with Regard to Structural Systems	134

BUILDING AND CONSTRUCTION

Opbul E.K., Shirunov G.N., Kaldar-ool A.-Kh.B., Saaya S.S. Crack Resistance and Rigidity of Bending Reinforced Concrete Structures Based on a Nonlinear Deformation Model	148
Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Selection of Sound Absorption Coefficients of Acoustically Effective Materials in Calculating Time-Variable Noise in a Room.....	169
Podshivalov I.I. Calculated Reliability Justification of the Church of New Martyrs and Confessors of Russia in Tomsk.....	181

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Vlasov M.A., Nikulin N.Yu., Gerasimov O.V., Petukhov A.A. Soil Creep in Building Foundation Strengthening on Experimental Site in Tomsk	192
--	-----

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

Rafalskaya T.A. Temperature Difference Effect on Heat Point Circuit in the Heating Network.....	207
Levin E.V., Okunev A.Yu. Transmission Heat Exchange of Buildings on Soil Foundations in Indoor Microclimate in Real External Meteorological Conditions	222

WATER SUPPLY, SEWERAGE,
BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Mokhov A.I., Shlychkov D.I., Chelonenko A.G., Kondrashova S.V. Integrated Engineering Approach to Stable Development of Water Supply and Sewerage Systems ..	238
--	-----

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

Kartopol'tsev V.M. Strength Analysis of Load-Bearing Beams of Tubular Bridges.....	249
Sivolap V.E., Efimenko S.V., Efimenko V.N., Churilin V.S., Sukhorukov A.V., Galyautdinov Z.R., Basharin A.D. Accuracy Assessment of Minimum Design Temperatures for Asphalt Carpet.....	260

STRUCTURAL MECHANICS

Saiyan S.G. Concept of Asynchronous Multi-Point Seismic Excitation as an Equivalent of Incident Surface Rayleigh Wave	271
Gerasimov S.I., Tikhomirov V.M., Popov A.M., Egorova A.V., Spiridonov A.A. Modeling of Nonuniform Settlement of Framed Structure Foundations	288

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 9–28.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 9–28.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.025.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-9-28

EDN: AYGBRF

МУЗЕИ ПОД ОТКРЫТЫМ НЕБОМ КАК СПОСОБ СОХРАНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ ЦЕРКВЕЙ НА ПРИМЕРЕ МУЗЕЯ «ВИТОСЛАВЛИЦЫ» В НОВГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Софья Евгеньевна Сахарова, Елена Владимировна Ситникова

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

Аннотация. *Актуальность.* Сохранение деревянного зодчества – важная и актуальная задача для большинства исторических поселений. Особый интерес представляют деревянные храмы как проявление русской национальной культуры. С ростом урбанизации многие исторические населенные пункты пустеют или совсем исчезают, в связи с чем возникают проблемы сохранения отдельных ценных объектов на родном месте.

Цель исследования – изучение методов переноса деревянных культовых зданий на новое место в попытках их сохранения на примере музеев под открытым небом в России. Изучен процесс формирования музея народного зодчества на территории Новгородской области «Витославлицы», в котором сохранилось значительное количество перевезенных деревянных православных церквей.

Новизной исследования является собранный и проанализированный материал по методике переноса деревянных церквей в музей под открытым небом «Витославлицы»; рассмотрены принципы организации и функционирования музея; концепция совершенствования работы музеев деревянного зодчества.

Результаты. В результате проведенного исследования были систематизированы и проанализированы исторические данные и практический опыт по сохранению объектов деревянного культового зодчества путем их транслокации в музейную среду. На примере музея «Витославлицы» была детально изучена и описана разработанная Л.Е. Красноречевым пятиэтапная методика переноса церквей, включающая историко-архивные изыскания, проектирование, разборку, транспортировку и сборку-реставрацию на новой территории. Выявлены и охарактеризованы ключевые принципы организации подобных музеев под откры-

тым небом: архитектурно-этнографический подход, секционная планировка, формирование композиционных доминант вокруг культовых построек и адаптивность генерального плана. В рамках работы также проанализирована государственная концепция развития музеев деревянного зодчества до 2025 г., что позволило сформулировать научно обоснованные предложения по совершенствованию их деятельности как многофункциональных научных, образовательных и туристических центров.

Ключевые слова: деревянная культовая архитектура, музеи под открытым небом, сохранение деревянного культового зодчества, музей народного деревянного зодчества «Витославлицы», концепция развития музеев под открытым небом, перенос деревянных церквей в музеи под открытым небом

Для цитирования: Сахарова С.Е., Ситникова Е.В. Музеи под открытым небом как способ сохранения деревянных церквей на примере музея «Витославлицы» в Новгородской области // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 9–28. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-9-28. EDN: AYGBRF

ORIGINAL ARTICLE

OPEN-AIR MUSEUMS FOR PRESERVATION OF WOODEN CHURCHES: VITOSLAVLITSY MUSEUM IN THE NOVGOROD REGION

Sofya E. Sakharova, Elena V. Sitnikova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Preservation of wooden architecture is an important and pressing issue for most historic settlements. Wooden churches, as a manifestation of the Russian national culture, are of particular interest. With increasing urbanization, many historic settlements become deserted or even disappear, raising the problem of preserving valuable structures in their original locations.

Purpose: The purpose is to examine methods of moving wooden religious buildings to new locations in an attempt to preserve them, using the example of open-air museums in Russia. The paper studies formation process of the Vitoslavlitsy Museum in the Novgorod region, where a significant number of relocated wooden Orthodox churches have been preserved.

Methodology: The paper works on the collected and analyzed data on the methodology for relocating wooden churches to the Vitoslavlitsy Open-Air Museum. The principles of organization and operation are discussed, as well as a concept for improving the work of wooden architecture museums.

Practical implications: Research materials can be used to conduct scientific research in the field and in the preparation of projects for the organization of museums, tourist routes and other events relating to the promotion and preservation of the historical and architectural heritage.

Keywords: wooden religious architecture, open-air museum, Vitoslavlitsy Museum, wooden church

For citation: Sakharova S.E., Sitnikova E.V. Open-Air Museums for Preservation of Wooden Churches: Vitoslavlitsy Museum in the Novgorod Region. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 9–28. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-9-28. EDN: AYGBRF

Русская национальная культура ярко проявляется в архитектурном наследии, особенно в уникальном деревянном зодчестве, которым славится Россия.

В деревянных постройках нашли отражение традиции различных народов страны, их мировоззрение и культурные ценности. Памятники деревянного зодчества играют важную роль в сохранении культурной идентичности народов, демонстрируя самобытность русской культуры. Эти объекты являются одной из важнейших составляющих вклада России в мировое культурное наследие, воплощая строительные и художественные достижения в широком спектре стилей и традиций. Однако проблема сохранения деревянных церквей с каждым годом обостряется. Многие деревянные памятники архитектуры находятся под угрозой исчезновения из-за воздействия времени, природных факторов и человеческой деятельности. Поэтому их сохранность, как объектов культурного наследия России, имеет большое значение.

В нашей стране дерево издавна было одним из наиболее распространенных строительных материалов. Деревянная архитектура в течение многих столетий определяла облик сел и городов, возводимых для защиты от врагов крепостей. Деревянные постройки разнообразны по функциям, назначению, особенностям использования дерева. Сохранение исторической архитектурной среды – прекрасная основа для развития культурного туризма в регионах.

Авторы статьи уже несколько лет занимаются выявлением и изучением деревянных церквей на территории бывшей Томской губернии, построенных во второй половине XIX – начале XX в. Данные исследования отражены в ряде научных публикаций: «Деревянное церковное строительство в Томской губернии во второй половине XIX – начале XX века» [1]; «Графическая реконструкция деревянной церкви во имя Святого пророка Ильи в с. Новоильинка Колпашевского района Томской области» [2]; «Сохранившиеся деревянные церкви Томской губернии второй половины XIX – начала XX века. Архитектурный анализ и проблемы сохранения» [3].

Проблемы, связанные с сохранением и использованием деревянного культового зодчества России, также рассматривали многие ученые, среди которых можно отметить работы А.Б. Бодя, Б.В. Гнедовского, Н. Голышева, Л.В. Даля, А.Т. Жуковского, Т.В. Незвицкой, Л.Д. Фирсовой, П. Цитова, П.О. Яблонского и др.

Необходимо отметить, что интерес к изучению церковного деревянного зодчества России появился сравнительно поздно. На территории Олонецкой губернии внимание данному вопросу одним из первых уделит Петр Цитов, профессор Олонецкой духовной семинарии. В 1852 г. он подготовил «Обозрение памятников древности, открытых при монастырях и церквях Олонецкой Епархии, касающихся преимущественно распространения христианства в здешней губернии. О некоторых церковных древностях Олонецкой губернии XIV–XVII веков». В 1858 г. член-корреспондент Отделения Русской и Славянской археологии А.Т. Жуковский обратил внимание на старинную деревянную церковь около г. Вытегры. Изображение этой Покровской церкви в с. Анхимово было опубликовано в «Журнале Главного Управления Путей Сообщения и Публичных Зданий». А.Т. Жуковский упоминает и об аналогичной церкви Кижского погоста, надеясь собрать по возможности полные сведения об этих двух памятниках.

Многие годы изучению деревянного зодчества посвятил иеромонах Алексей Виноградов. Задуманная им в 1874 г. работа по исследованию памятников

деревянного церковного зодчества XVII–XVIII вв. в Новгородской, Тверской, Ярославской, Иркутской и Красноярской епархиях была завершена в 1895 г. В 1876 г. Алексей Виноградов получил согласие Императорского Русского Археологического Общества на изучение памятников древнерусского зодчества «и других предметов старины» в Тверской, Новгородской и Ярославской епархиях, знакомых ему с детства. Со временем у него образовалась коллекция чертежей древнерусских церквей и часовен, «всего свыше ста номеров» [4].

Архитектор-реставратор А.Б. Боде отмечает, что деревянное зодчество наряду с эпосом, иконописью и народной музыкой составляет фундамент русской культуры, отличаясь уникальностью и непреходящей ценностью в мировом контексте. Особого внимания, по его мнению, заслуживают деревянные церкви, которые благодаря своим архитектурным достоинствам являются наиболее выразительными образцами этого искусства. Среди них встречаются бревенчатые сооружения высотой до 30–40 м, поражающие красотой и масштабом, однако их состояние вызывает тревогу.

В настоящее время в России широко развиты общественные инициативы, такие как проект «Общее дело» и фонд «Вереница», объединяющие людей, осознающих культурную значимость деревянного зодчества. Участники этих движений, часто хорошо организованные и мотивированные, регулярно выезжают в северные регионы страны для работы по сохранению деревянных церквей, иногда возвращаясь в одни и те же места годами. Многие объекты, с которыми работают добровольцы, не имеют официального статуса памятников, что дает определенную свободу действий, но также накладывает ответственность. Волонтеры расчищают завалы, удаляют растительность, укрепляют конструкции и проводят консервационные работы, стремясь сохранить здания для будущих поколений. Андрей Боде активно участвует в этом процессе, оказывая экспертную поддержку, проводя образовательные лекции и практические занятия для добровольцев, а также он создал организацию по сохранению исторических построек АНО «Традиция» [5]. Деятельность организации демонстрирует, как гражданская инициатива может стать движущей силой в деле сохранения культурного наследия.

Особую опасность утраты составляют объекты, расположенные в отдаленных от цивилизации уголках страны, в исчезающих населенных пунктах. Тогда одним из путей их сохранения является перенос объекта на новое место. Специалисты десятилетиями обсуждали эту проблему, но до сих пор нет единого мнения. Понятны и общеизвестны все аргументы «за» и особенно «против», когда памятник вырывается из естественного исторического и природного окружения, теряет связь с малой родиной. Также при этом высоки риски утраты и повреждения подлинника при перевозке. Но если альтернатива перемещению – неминуемая гибель объекта, эти аргументы отступают на второй план. Поэтому перемещение памятников в исключительных случаях допускают и международные конвенции, и наше национальное законодательство. Минкультуры РФ официально разъясняет, что перемещение объекта культурного наследия должно быть обосновано «невозможностью его сохранения на настоящем месте расположения в силу наличия негативных воздействий неустраняемого характера» [5].

Таким образом, с учетом всех рисков перемещение исторического памятника – крайняя мера и исключительное решение, принимаемое во имя его спасения, а не ради облегчения жизни его собственников и пользователей [6]. В результате такого подхода в середине XX в. стали широко практиковать устройство музеев под открытым небом.

История возникновения музеев под открытым небом началась еще в 1891 г., когда шведский исследователь и этнограф А. Хазелиус открыл доступ публики к объектам на о. Юргорден, который сегодня оказался практически в самом центре Стокгольма. Жилые дома и хозяйственные постройки были привезены на остров в 1885 г. из селения Мора, так появился музей-деревня «Скансен», первый в мире музей под открытым небом [7].

У истоков первых российских музеев под открытым небом стояли видные ученые: П.Д. Барановский, И.В. Маковецкий, А.В. Ополовников, Е.А. Ащенок, А.П. Окладников и др., но создавались большинство из них по проектам и под руководством опытных архитекторов-реставраторов. Среди них одним из ведущих специалистов был Б.В. Гнедовский. Некоторые из его объектов исследования или практической реставрации вошли в состав первых отечественных музеев – Кижи, Кострома, Пермь. Он консультировал по техническим вопросам перевозки срубных конструкций (Суздаль) и реставрации деревянных построек в мемориальных комплексах (Красноярск, Пятигорск, Липецк, Самара и др.), участвовал в выборе места под новые музеи (Пермь, Вятка). С его именем связана организация целого ряда музеев народной архитектуры. Наряду с Кижями наиболее полноценной экспозицией можно назвать музей-заповедник в с. Шушенском, который создавался под его непосредственным авторским руководством [8, 9].

Первый российский опыт создания музея под открытым небом был представлен на Всероссийской сельскохозяйственной и кустарно-промышленной выставке в Москве в 1923 г. В рамках генерального плана выставки была создана небольшая улица из нескольких крестьянских усадеб, перевезенных из разных местностей страны. В 1927–1934 гг. в парке-музее подмосковного с. Коломенское были размещены памятники деревянного зодчества XVII–XVIII вв. Активное строительство музеев деревянного зодчества или этнографических музеев под открытым небом началось в 60–70-х гг. XX в. [7]. В этих музеях можно на время погрузиться в мир народной культуры, почувствовать мощное эмоциональное воздействие удивительных по красоте произведений плотников-зодчих прошлых веков.

Первые отечественные музеи под открытым небом создавались в 1950–70-х гг., когда стал очевидным «уход в небытие» не только отдельных выдающихся сооружений из дерева, но и самих традиций древнего строительного мастерства. Тогда и возник вопрос, как музеефицировать деревянные постройки, не поддающиеся другим формам адаптации в современных условиях, реставрировать ли их только на старых местах или возможна перевозка на новые территории [9].

В России есть несколько известных музеев под открытым небом, где сохранились деревянные церкви.

1. Остров Кижи, Карелия.
2. Село Витославицы, Новгородская область.
3. Малые Корелы, Архангельская область.
4. Парк Коломенское, Москва.
5. Музей деревянного зодчества в Суздале.
6. Хохловка, Пермский край.
7. Тальцы, Иркутская область и др.

Настоящее исследование посвящено изучению формирования музея под открытым небом «Витославицы» в Новгородской области, на примере которого рассмотрен перенос исторических деревянных церквей на новое место как один из способов их сохранения.

Идея создания музея под открытым небом «Витославицы» принадлежит архитектору-реставратору и искусствоведу Леониду Егоровичу Красноречеву, который вел все процессы транспортировки и реставрации объектов, расположенных в настоящее время на территории музея. В команду архитекторов-реставраторов и плотников входили также: Т.В. Гладенко, М.А. Никольский, Г.М. Штендер, Г.П. Липатов, В.Ф. Платонов Е.А. Стрижов [10].

Датой основания музея «Витославицы» принято считать 5 июня 1964 г., когда решением исполкома Новгородсовета для территории музея была выделена бывшая Орловская мыза. 31 января того же года был подписан приказ Министерства культуры РСФСР «О мерах улучшения охраны памятников деревянного зодчества», по которому в числе других городов предлагалось создание музея под открытым небом в Новгороде.

На выбор были предложены варианты мест для будущего размещения музея: в южной части Кремля «Детинец», в Воскресенской слободе и др. В итоге выбрали территорию, которая находится недалеко от Великого Новгорода, рядом с Юрьевым монастырем, всего в 4 км от Новгорода, на территории Орловской мызы между дорогой в д. Юрьево и оз. Мячино.

Музей расположен на окраине Новгорода, его территория занимает около 50 га (рис. 1). На обширной низменности на берегу оз. Мячино, у стен Юрьева монастыря, в X–XII вв. стояло с. Витославицы, позднее был организован Пантелеймонов монастырь, напоминанием о котором служат руины каменных зданий. В XIX в. здесь располагалась усадьба А.А. Орловой, от которой сохранился тенистый парк, главный дом и флигель.

В центре музейной территории, в Мстинском секторе, вдоль «деревенской улицы» в два ряда поставили крестьянские усадьбы, облик которых непривычен для других мест – вдоль фасадов изб тянутся открытые галереи на резных столбиках. Это «прикольки», известные по документам с XVII в., защищающие нижние венцы сруба от влаги, служащие прикрытием от дождя. Местный колорит включает индивидуальное декоративное убранство фасадов изб: резные наличники окон и ставен, протяженные узорчатые парапеты во фронтонах. В домовой резьбе сочетаются мотивы разного происхождения: скульптурная обработка конструкций кровель в виде птичьих или конских голов, традиционные прорезные «солнышки» на полотенцах и причелинах, заимствованные из городской архитектуры барочные волюты, балясины, занавеси с кистями. Особенно интересен декор избы Екимовой (рис. 1, № 2).



Рис. 1. План-схема музея народного деревянного зодчества «Витославицы» [10]

Fig. 1. Floor plan of the Vitoslavlitsy Museum of Folk Wooden Architecture [10]

В организации пространства домов чувствуются традиционность бытового уклада, столетиями отработанные архитектурно-строительные приемы. Для тех, кто уже знаком с северорусским жилищем, здесь все узнаваемо, хотя и имеются местные особенности. Огромный хозяйственный двор с высокими массивными опорными столбами перекрыт с избой единой двускатной крышей. Здесь и помещения для животных, и сеник, и лари для хранения урожая; ближе к избе хранятся заготовки и изделия промысла, которым занимался владелец дома. В доме Туницкого стоят на продажу бочки, в доме Шкипарева плетенные из бересты и лыка лапти, короба, туеса, в доме Екимовой – орудия для обработки льна. Сбоку к избам пристроены «передки» под односкатной кровлей, где хранятся повозки, сезонный инвентарь, коромысла.

Однако особый интерес и выразительность ансамблю музея придают храмы. Большинство перевезенных сюда церквей относится к XVII в. и принадлежат к клетскому типу храмов. Они удачно размещаются то на опушке леса, то на околице, напоминая о своем первоначальном месте. В рамках исследования важно выделить специфику переноса деревянных церквей на территорию музея и определение места их нового расположения, учитывая их исторические планировочные особенности.

Методика переноса деревянных культовых зданий на территорию музея «Витославицы»

Каждое деревянное культовое здание, которое можно увидеть в музеях под открытым небом, по-своему уникально, и процесс переноса на другие территории таких объектов также индивидуален. Тем не менее разработанная Л.Е. Красноречевым и его командой методика переноса деревянных церквей, которой придерживались специалисты, перевозившие здания в музей под открытым небом «Витославицы», включала пять основных этапов.

1. Историко-архивные и натурные исследования церкви.
2. Разработка проекта реставрации.
3. Разборка.
4. Транспортировка.
5. Сборка.

Первый этап. Историко-архивные и натурные исследования – полноценное изучение исследуемого здания:

- анализ исторических данных (исторические фотографии, записки, чертежи и прочие документы, которые позволят определить первоначальный облик исследуемого объекта);

- анализ существующего состояния (фотофиксация, обмеры);

- выполнение обмерных фиксационных чертежей (планов, фасадов, разрезов), а также чертежей отдельных фрагментов и деталей. Дополнительно подготовлена пояснительная записка, сопровождающая проект.

Второй этап. Разработка проекта реставрации – разработка проекта, по которому будут осуществляться все последующие работы и авторский надзор. Проект содержит как основные чертежи, так и чертежи отдельных фрагментов. Чертежи основываются на историко-архивных исследованиях и направлены на возвращение объекта к первоначальному облику.

Третий этап. Разборка – удаление большинства поздних наслоений, освобождение памятника от поздних вмешательств и возврат его к исходным формам. Проводятся дополнительные исследования памятника, выполняются обмеры ранее недоступных мест, осуществляется фотофиксация процессов работы, ведется журнал с записями и схематической разметкой.

Разметка осуществляется металлическими бирками с двойной нумерацией: первая цифра указывает на часть постройки, вторая – на конкретный элемент. Разметка идет снизу вверх с учетом поврежденных и гнилых бревен нижнего венца. Снятые элементы аккуратно опускались на землю по специальным следам с помощью веревок.

Четвертый этап. Транспортировка объекта с исторического места до нового – музея. Опущенные элементы перемещают на временные складские площадки, где крепят все части и связывают их в пакеты. Затем с помощью автокрана загружают пакеты на лесовозы или бортовые машины и доставляют на место сборки в музей.

Пятый этап – сборка перевезенного здания на новом месте. Сборка осуществляется в строгом соответствии с проектом реставрации. Чертежи проекта регулярно предоставлялись на стройплощадку, обеспечивая авторский надзор и техническое руководство. Под церкви закладывались столбчатые фундаменты с валунной забиркой между ними. Подгнившие нижние бревна заменяли новыми, а далее следовал порядок сборки – снизу вверх. Параллельно велись реставрационные работы по восстановлению оконных и дверных проемов, укладке полов и потолков, а далее и декоративных элементов.

Весь процесс работ сопровождается строгим соблюдением плана и дисциплины. Элементы располагаются в четкой последовательности, соответствующей различным частям сооружения, чтобы избежать путаницы. Это правило применяется на всех этапах – от разборки до перевозки и выгрузки, что позволяет точно и эффективно собирать памятник.

При транспортировке зданий у команды Л.Е. Красноречьева возникали трудности:

- сложный или труднодоступный рельеф местности, на которой исторически располагался объект;
- погодные условия;
- недостаток специалистов (существуют примеры, когда была необходимость ожидания специалистов и их возвращения с работы на других объектах);
- недостаток материалов;
- ограниченная финансовая ситуация.

Деревянные церкви, перевезенные в музей под открытым небом «Витославицы»

На рис. 2 представлен план-схема музея народного деревянного зодчества «Витославицы».

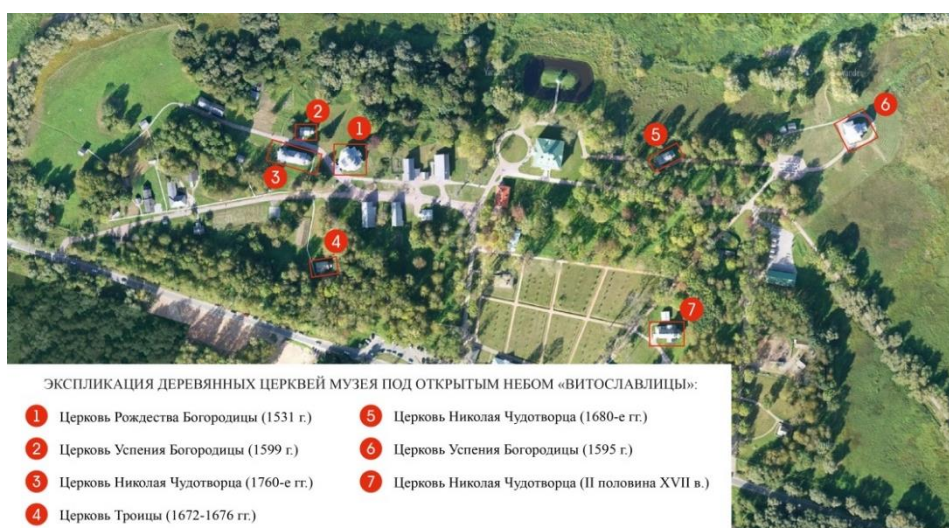


Рис. 2. План-схема музея народного деревянного зодчества «Витославицы» с обозначением исследуемых деревянных церквей. Выполнила С.Е. Сахарова

Fig. 2. Plan of the Vitoslavlitsy Museum of Folk Wooden Architecture with wooden churches. Prepared by S.E. Sakharova

Церковь Успения Богородицы из деревни Курицко на берегу озера Ильмень Новгородской области (рис. 2, № 6)

Проектирование музея началось в 1959 г., а практическая перевозка памятников с Успенской церкви 1595 г. постройки из с. Курицко, заложившая основу экспозиции, – в 1964–1965 гг. Храм стоял на берегу оз. Ильмень, отмечая место рыбацкого поселка. Поскольку памятник рассчитан на восприятие издалека, он практически лишен резного декора. Его пропорции позволяют отнести это древнейшее из сохранившихся сооружений типа восьмерик на четверике, увенчанное шатром, к числу наиболее совершенных произведений местных зодчих (рис. 3).



Рис. 3. Церковь Успения Богородицы с. Курицко Новгородской области (1595 г.) [11]
Fig. 3. Church of the Assumption of the Virgin Mary in Kuritsko, Novgorod Region (1595) [11]

Особенностями Успенской церкви являются венчатые стены галереи, ранний вариант типа восьмерик на четверике, протесанные снаружи «на брус» стены восьмерика и волоковые окна с двумя кожухами [10, 12].

Перенос и восстановление объекта осуществлялись с 14 августа по сентябрь 1964 г. по проекту Л.Е. Красноречьева. Работу выполняли плотники М.Ф. Борисов (бригадир), А.М. Борисов, А.Е. Козлов, А.А. Кириллов, А.Н. Хромов и П.У. Трофимов. Позднее присоединился Н.И. Леонтьев.

Сотрудник Московской ГЦХРМ (химической мастерской) Д.В. Сорокина делала пробное укрепление пораженной древесины (24 сент.) раствором мочевиноформальдегидной смолы. Из-за недостаточно качественных компонентов и влажной древесины эксперимент оказался неудачным. Такая же попытка, предпринятая осенью 1965 г., кончилась тем же.

*Церковь Рождества Богородицы из села Предки Боровического района
Новгородской области (рис. 2, № 1)*

За Мстинским сектором возвышается своеобразный архитектурный ансамбль, воспроизводящий облик древнерусского погоста. Церковь, возведенная в 1530-х гг., была частью Рождественского монастыря, упраздненного в XVIII в., является редчайшим сохранившимся памятником деревянного зодчества XVI столетия. Храм представляет собой крестообразный в плане объем, к которому с трех сторон примыкает крытая галерея. В трех частях крестового объема находятся три престола: главный – в честь Рождества Богородицы, северный – посвящен Николаю Чудотворцу, южный – Никите Мученику. Венчается постройка одним главным и двумя малыми шатрами с главками, крытыми лемехом. Этот тип шатрового храма с крестообразным планом впоследствии стал основой для развития многоглавых церквей (рис. 4).

Несмотря на то что церковь претерпела коренную реконструкцию при перевозке и реставрации, ее воссозданные части (шатры, галерея с распашным крыльцом, дверные колоды и другие детали) выполнены современными новгородскими плотниками столь искусно, с таким пониманием художественных достоинств самой текстуры дерева, что воспринимаются как традиционные.

Перенос и восстановление объекта происходили с 14 ноября 1967 г. по конец июня 1971 г. Общее время выполнения всех этапов работ составило бо-

лее четырех лет, включая исследование памятника и раскрытие его древних частей. Длительность процесса объяснялась не только сложностью работ, но и частым отвлечением специалистов на другие объекты.



Рис. 4. Церковь Рождества Богородицы Новгородской области (1530 г.) [12]

Fig. 4. Church of the Nativity of the Virgin Mary in the Novgorod Region (1530) [12]

Реставрация ориентирована на возвращение памятнику архитектурно-художественного облика 1531 г. с сохранением некоторых элементов конца XVII столетия, в том числе двух малых шатров и части деталей первой половины XIX в. В древности в храме имелся трехъярусный иконостас. Сейчас в здании храма действует выставка, посвященная его истории и реставрации [10, 11].

*Церковь Николая Чудотворца из деревни Высокий Остров
Окуловского района Новгородской области (рис. 2, № 3)*

В ансамбль «погоста» входит также ярусная Никольская церковь, возведенная в 1779–1781 гг., из деревни Высокий Остров, памятник времени близящегося заката народного культового зодчества (рис. 5).



Рис. 5. Церковь Николая Чудотворца из д. Высокий Остров Новгородской области (1779–1781 гг.) [13]

Fig. 5. Church of St. Nicholas the Wonderworker from the village of Vysokiy Ostrov in the Novgorod Region (1779–1781) [13]

Церковь корабельного типа в плане, многоярусная, колокольня с шатровым завершением. Важная особенность – функциональное соотношение между трапезной и церковью, выразившееся в архитектурно-планировочном решении, трапезная уже не четко изолирована от помещения для молящихся. Их связывает широкий арочный проем без дверных полотен.

Перенос и восстановление объекта происходили с 1977 по 1989 г. Проект реставрации уточнялся и детализировался на основе эскизов. Появлялись новые решения: галерея с тремя крыльями, новая форма колокольни, изменения в расположении и оформлении окон, корректировки деталей крыш и др. Архитектор института «Спецпроектреставрации» Б.Н. Зайцев выступал рецензентом проекта, который впоследствии рассматривался и принимался на научном совете и в Госинспекции МК РСФСР (1977 г.). Постоянными плотниками были Е.А. Стрижов (бригадир), Г.П. Липатов, А.А. Карташов, М.А. Дмитриев, Н.И. Кириллов [10, 13].

*Церковь Успения Богородицы из деревни Никулино
Новгородской области (рис. 2, № 2)*

Недалеко от церкви Николая Чудотворца из д. Высокий Остров стоит миниатюрная клетская Успенская церковь из д. Никулино, выстроенная в 1599 г., отличающаяся обликом, близким к традиционным формам изб. Представляет собой трехчастную композицию (алтарь, молельня, трапезная с притвором) с высокой двускатной крышей (рис. 6).



Рис. 6. Церковь Успения Богородицы из д. Никулино Новгородской области (1599 г.) [14]
Fig. 6. Church of the Assumption of the Virgin Mary from Nikulino, Novgorod Region (1599) [14]

Перенос и восстановление объекта происходили с июня 1975 г. по декабрь 1977 г. Проект рассматривался на научно-реставрационном совете Новгородской специальной научно-реставрационной производственной мастерской № 9 (СНРПМ9) 15 апреля 1976 г. (протокол № 52), был одобрен и согласован в производственной группе по охране памятников Управления культуры Новгородского облисполкома. Большой временной разрыв в проведении работ

обусловлен тем, что плотников неоднократно отвлекали на другие объекты. Регулярно работали на объекте только три плотника: Е.А. Стрижов (бригадир), Г.И. Липатов и А.Я. Карташов, иногда им помогали зав. «Витославлицами» Л.А. Филиппова, научный сотрудник Л.В. Паршина (разборка и упаковка икон и иконостаса) и Л.Е. Красноречьев.

Место для Успенской церкви из д. Никулино в «Витославлицах» было определено недалеко от транспортированной ранее на территорию музея Рождественской церкви из с. Передки. Вместе с ней и Никольской церковью из Высокого Острова эти культовые постройки составили ядро создаваемого на территории музея комплекса «Погост», композиционный центр «Витославлиц».

Работы по сборке и реставрации церкви велись в строгом соответствии с разметочными таблицами (схемами) и проектом реставрации, сопровождались постоянным руководством и надзором научного руководителя объекта. После перевозки, сборки и реставрации объект был принят государственной комиссией с отличной оценкой [10, 17].

*Церковь Николая Чудотворца из деревни Мякишево
Новгородской области (рис. 2, № 7)*

Никольская церковь из д. Мякишево представляет собой уникальный памятник архитектуры, не имеющий аналогов. В ее объемно-пространственной композиции органично соединены черты клетских, крещатых и ярусных построек. Сложное объемное решение храма включает ступенчатые двускатные кровли, венчающие крестообразный в плане основной объем. Церковь возведена во второй половине XVII в. и является одним из примечательных архитектурных экспериментов эпохи, появившихся после запрета на строительство шатровых храмов (рис. 7).



Рис. 7. Церковь Николая Чудотворца из д. Мякишево Новгородской области (вторая половина XVII в.) [15]

Fig. 7. Church of St. Nicholas the Wonderworker from Myakishevo village, Novgorod Region (17th century) [15]

Перенос и восстановление объекта осуществлялись с 12 октября по 18 ноября 1976 г. Сроки работ неоднократно сдвигались из-за отвлечения плотников на иные объекты: возникали перерывы продолжительностью от полутора до девяти-надцати месяцев, общая длительность которых составила около двух лет [10, 15].

*Церковь Николая Чудотворца из деревни Тухоли
Новгородской области (рис. 2, № 5)*

Церковь, возведенная в 1680-х гг., состоит из алтаря, собственно храма (молельни) и трапезной. Каждый объем имеет собственную двухскатную крышу, выполненную «по курицам» (специально обработанные еловые бревна с сучками) и «потокам» (бревна с желобами для стока воды) (рис. 8).



Рис. 8. Церковь Николая Чудотворца из д. Тухоли Новгородской области (1680-е гг.) [17]
Fig. 8. Church of St. Nicholas the Wonderworker in Tukholy village, Novgorod Region (1680s) [17]

Перенос и восстановление объекта происходили с июля 1963 по 1968 г. Совместно с Н. Красноречевой было проведено обследование храма, определены примерные даты строительства, проведены фотосъемка, обмеры и составлены графические реконструкции. Дополнительные исследования состоялись в июле 1966 г. перед разборкой и перевозкой памятника в «Витославицы» [10, 14].

Клетская Тухольская церковь представляет собой типовую постройку. Однако благодаря мастерству плотников ей удалось придать определенную монументальность: был увеличен центральный объем и добавлены промежуточные полицы.

Церковь Троицы из деревни Рекони Новгородской области (рис. 2, № 4)

Церковь, возведенная в 1672–1676 гг., имеет трехчастную композицию: квадратный в плане алтарь; основной объем церкви (также квадратный в плане); трапезная, близкая к квадрату и сопоставимая по размерам с церковью (рис. 9).

Трапезная пристроена вплотную к церкви, но значительно позднее. Центральный объем возвышается над двумя другими частями. Все объемы перекрыты двускатными крышами с тесовой кровлей.

Особая ценность памятника – в сохранности изначального кровельного покрытия: в XIX в. церковь, в отличие от большинства старинных храмов, не была перекрыта листовым железом. Над средним объемом размещена небольшая главка. С южной стороны к церкви и трапезной пристроено крыльцо (рис. 9).

Были выполнены и чертежи по реконструкции церкви в первоначальном облике, т. е. в формах середины XVII в. Памятник обследовался специалистами: в 1969 г. его осмотрела научный сотрудник Новгородского музея

В.М. Ковалёва, сообщив о результатах устно. В 1972 г. студенты архитектурного факультета ЛИСИ выполнили обмеры церкви.



Рис. 9. Церковь Троицы из д. Рекони Новгородской области (1672–1676 гг.) [16]

Fig. 9. Trinity Church in Rekoni village, Novgorod Region (1672–1676) [16]

Для Троицкой церкви в Витославицах выбрано особое, обособленное место – на небольшом участке к югу от основного экскурсионного маршрута музея [10, 16].

В целом можно отметить, что музей «Витославицы» – это проект, который показывает на своем примере актуальность и работоспособность методики сохранения деревянных объектов, разработанной Л.Е. Красноречьевым и его командой. Подбор памятников деревянного зодчества для перевозки и реставрации диктовался их аварийным состоянием и необходимостью спасения от гибели. Кроме того, этот музей – один из самых гармонично скомпонованных, талантливо сочетающий в своем облике оба принципа построения и музея-парка, и музея-села.

В результате проведенного обзора перевезенных объектов, рассмотрения методики их восстановления и организации генерального плана музея можно выделить цели и основные принципы формирования музея «Витославицы».

Целью формирования музея является спасение ценных деревянных построек. При этом позднейшие, малоценные и искажающие памятник наслоения удаляются, объект реставрируется или реконструируется на основе научно обоснованных данных.

Принципы организации и функционирования музея следующие:

- принцип архитектурно-этнографического музея, основная функция – экспозиция деревянных сооружений;
- планировочная основа – секторы крестьянских усадеб с максимально возможным набором всех построек;
- постройки отбираются не по времени их возведения, а по содержанию народных традиций – памятники народного зодчества первой половины XVI–XIX в., отражающие характерные планировочные структуры старых новгородских деревень;

– главные архитектурные особенности региона отражаются путем создания секторов с композиционными центрами с культовыми постройками, главный сектор музея – группа культовых сооружений с административными и хозяйственными постройками;

– генеральный план музея и его секторов и комплексов корректируется в процессе его создания;

– музей должен быть живым организмом – территория «нагружается» не только большим потоком туристов, но и ремесленной, торговой, игровой, фольклорной деятельностью, праздниками, огородами, садами и пр.

На пленуме научно-методического совета МК СССР (г. Киев, апрель 1977 г.) Л.Е. Красноречьев защищал методы, которые используются в Новгороде им и его командой. Методика была одобрена. Важно, чтобы при этом принципы соблюдались и развивались, чтобы основная идея, заложенная в характер музея, не нарушалась, отход от принципов и основной идеи крайне нежелателен [10].

Таким образом, можно сделать вывод об актуальности создания музеев под открытым небом, т. к. появляется шанс сохранения памятников деревянного зодчества, тем самым и нашей истории.

Музеи деревянного зодчества – одна из успешных форм сохранения памятников деревянной архитектуры, сохранение которых на историческом месте невозможно или проблематично, например, по следующим причинам:

– здания церкви расположены на обрыве, где есть риск оползней;

– здание расположено на удаленной территории от населенных пунктов или в утраченных населенных пунктах.

Для совершенствования работы музеев под открытым небом и создания возможности их развития Министерство культуры РФ выпустило концепцию сохранения памятников деревянного зодчества и включения их в культурный оборот до 2025 г., в которой отмечен ряд положений:

1. Необходимо своевременное проведение консервационных и реставрационных работ, а также соблюдение основных принципов сохранения и использования памятников. Эти задачи должны входить в состав государственного задания и иметь приоритетное финансирование. При оценке деятельности музея именно их выполнение должно учитываться в первую очередь.

2. Музеи деревянного зодчества должны развивать функции научных, образовательных и методических центров деревянного зодчества, служить базой подготовки реставраторов и популяризации народной строительной культуры и архитектуры. В связи с этим в штатное расписание каждого музея необходимо ввести должности архитектора-реставратора, главного инженера-реставратора и плотников-реставраторов с правом проведения работ по ремонту памятников на территории музея.

3. Необходимо расширить функции музеев по сохранению памятников деревянного зодчества, рассмотрев возможность лицензирования реставрационного музейного центра. На базе музеев деревянного зодчества должны проводиться конференции, семинары и круглые столы, посвященные проблемам сохранения и использования памятников деревянного зодчества и среды их существования.

4. Учитывая значительный потенциал музеев-заповедников, стоит подчеркнуть необходимость их активного участия в создании имиджа региона, формировании музейно-туристского продукта, включения в систему культурно-познавательного туризма России. К числу приоритетов в деятельности музея следует отнести активную медиаполитику по продвижению памятников деревянного зодчества в культурное пространство, участие в инициировании разработки инвестиционных проектов создания развитой туристской инфраструктуры [18].

Рассмотрим ключевые направления концепции.

1. *Научные исследования и публикации* для поддержки исследования архитектуры с выпуском книг и научных статей, которые подробно описывают особенности деревянного зодчества в том или ином регионе с их богатством и индивидуальностью.

2. *Госпрограммы и финансирование* для включения вопросов сохранения деревянного зодчества в федеральные программы по культуре, туризму, образованию и цифровизации, а также для создания туристических маршрутов и навигационной системы по памятникам деревянной архитектуры для упрощения доступа туристов, что поспособствует большим потокам и частому поступлению финансовой поддержки для объектов от посетителей и неравнодушных.

3. *Информационные ресурсы* для разработки единого интернет-портала с данными о памятниках, реставрационных работах и научных исследованиях, а также для запуска онлайн-изданий для обсуждения актуальных проблем, обмена опытом и продвижения лучших практик.

4. *Образование и просвещение*, которые включают в себя введение тем, связанных с деревянным зодчеством, в школьные и вузовские программы (история, краеведение, искусство). А также подготовка и издание «Атласа архитектурно-этнографических музеев России» для широкой аудитории с четкой логистикой.

5. *Культурные и медийные проекты* в виде документальных и художественных фильмов, публикаций в СМИ, выставок и других проектов, посвященных деревянной архитектуре, для демонстрации объектов с современной стороны, для увеличения интереса к сохранению объектов и их актуализации.

6. *Межведомственное взаимодействие* для координации работы министерств, музеев, реставраторов и общественных организаций для эффективного сохранения памятников.

Все вышеперечисленные пункты важны по той причине, что многие памятники деревянного зодчества находятся под угрозой исчезновения. Данная концепция поможет не только сохранять деревянные культовые объекты, но и сделать их доступными для людей – через туризм, образование, интернет и СМИ. Такой подход позволит сохранить для будущих поколений уникальное наследие русской деревянной архитектуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сахарова С.Е., Ситникова Е.В. Деревянное церковное строительство в Томской губернии во второй половине XIX – начале XX века // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 2. С. 9–23.

2. Сахарова С.Е., Ситникова Е.В. Сохранившиеся деревянные церкви Томской губернии второй половины XIX – начала XX века. Архитектурный анализ и проблемы сохранения // Избранные доклады 69-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 20 апреля 2023 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. С. 526–530.
3. Сахарова С.Е., Ситникова Е.В. Мировой опыт сохранения и адаптации деревянных церквей // Избранные доклады 70-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 18 апреля 2024 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. С. 573–576.
4. Гуцина В.А. К истории изучения культового деревянного зодчества в России и Олонецкой губернии // Кижский вестник. 1999. № 5. С. 166–179.
5. Марьяновская О. Реставратор Андрей Бодэ: «Основная цель восстановления храмов – возвращение в них богослужения» // Газета КУЛЬТУРА : [сайт]. URL: <https://portal-kultura.ru/articles/kulturnaya-politika/326338-restavrator-andrey-bode-osnovnaya-tsel-vosstanovleniya-khramov-vozvraschenie-v-nikh-bogosluzheniya/> (дата обращения: 15.12.2025).
6. Хранители наследия. Независимое СМИ об архитектурном наследии // Хранители наследия : [сайт]. URL: <https://hraniteli-nasledia.com/articles/iniatsiiv/pereezd-ravnosilen-pozharu/> (дата обращения: 15.12.2025).
7. Гайдук М.Ю., Клименко А.И., Храмов А.Б. Музеи народного зодчества под открытым небом: обзор создания и развития в России // Вестник славянских культур. 2021. № 61. С. 38–63. DOI: 10.37816/2073-9567-2021-61-38-63. EDN EWGFBA
8. Гнедовский Б.В., Добровольская Э.Д. Музеи под открытым небом в СССР: развитие принципов формирования и структуры // Музейное дело и охрана памятников. Москва : Наука, 1987. Вып. 2. 21 с.
9. Гнедовский Б.В. Памятники деревянного зодчества России в музеях под открытым небом. 12 старейших музеев народного зодчества и быта. Москва : Пробел-2000, 2002. 68 с.
10. Красноречьев Л.Е. Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества. По опыту работ в Новгородской области. Санкт-Петербург : Дмитрий Буланин (ДБ), 1999. 57, [2] с. ISBN 5-86007-159-0.
11. Церковь Рождества Богородицы (XVI век) из села Предки Боровического района // novgorod.ru : [сайт]. URL: <https://www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/christmases-virgin/> (дата обращения: 15.12.2025).
12. Церковь Успения Богородицы // novgorod.ru : [сайт]. URL: <https://www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/yspeniya-virgin/> (дата обращения: 15.12.2025).
13. Никольская церковь из деревни Высокий Остров Окуловского района // novgorod.ru : [сайт]. URL: <https://www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/nikolskaya-ostrov/> (дата обращения: 15.12.2025).
14. Успенская церковь из деревни Никулино Любытинского района // novgorod.ru : [сайт]. URL: <https://www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/yspenskaya/> (дата обращения: 15.12.2025).
15. Никольская церковь из деревни Мякишево // novgorod.ru : [сайт]. URL: <https://www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/nikolskaya-myakishevo/> (дата обращения: 15.12.2025).
16. Троицкая из Рекони // novgorod.ru : [сайт]. URL: <https://www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/troickaya/> (дата обращения: 15.12.2025).
17. Никольская церковь из деревни Тухоли // novgorod.ru : [сайт]. URL: <https://www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/nikolskaya-tuholya/> (дата обращения: 15.12.2025).
18. Концепция сохранения памятников деревянного зодчества и включения их в культурный оборот до 2025 года. Москва, 2016. 155 с. URL: <https://culture.gov.ru/upload/iblock/877/8776838151b96355d08d3e426dbf8828.pdf> (дата обращения 15.12.2025).

REFERENCES

1. Sakharova S.E., Sitnikova E.V. Wooden Church Construction in Tomsk Province Late in the 19th and Early 20th Centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (2): 9–23. (In Russian)

2. Sakharova S.E. Surviving Wooden Churches of Tomsk Province from the Second Half of the 19th - Early 20th Centuries. Architectural Analysis and Preservation Problems. In: *Proc. 69th Univ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists*. Tomsk, April 20, 2023. Tomsk: TSUAB, 2023. Pp. 526–530. (In Russian)
3. Sakharova S.E. World Experience in Preserving and Adapting Wooden Churches. In: *Proc. 70th Univ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists*. Tomsk, April 18, 2024. Tomsk: TSUAB, 2024. Pp. 573–576. (In Russian)
4. Gushchina V.A. On the History of the Study of Religious Wooden Architecture in Russia and the Olonets Province. *Kizhskii vestnik*. 1999; (5): 166–179. (In Russian)
5. Maryanovskaya O. Restorer Andrei Bode: The main goal of restoring churches is to return them to religious services. Available: <https://portal-kultura.ru/articles/kulturnaya-politika/326338-restavrador-andrey-bode-osnovnaya-tsel-vosstanovleniya-khramov-vozvrashchenie-v-nikh-bogosluzheniya/> (accessed December 15, 2025) (In Russian)
6. Guardians of heritage. Independent media covering architectural heritage. Available: <https://hraniteli-nasledia.com/articles/initiativy/pereezd-ravnosilen-pozharu/> (In Russian)
7. Gaiduk M.Yu. Open-Air Museums of Folk Architecture: An Overview of Creation and Development in Russia. *Vestnik slavyanskikh kul'tur*. 2021; (61): 38–63. DOI: 10.37816/2073-9567-2021-61-38-63. EDN: EWGFBA (In Russian)
8. Gnedyovskiy B.V., Dobrovolskaya E.D. Open-air museums in the USSR: Principles of formation and structure. In: *Museum Affairs and Protection of Monuments*. Moscow: Nauka, 1987; (2) 21. (In Russian)
9. Gnedyovskiy B.V. Monuments of Russian Wooden Architecture in Open-Air Museums. 12 Oldest Museums of Folk Architecture and Everyday Life. Moscow: Probel-2000, 2002. 68 p. (In Russian)
10. Krasnorechyev L.E. Research and Restoration of Wooden Architecture Monuments. Based on Experience in the Novgorod Region. Saint-Petersburg: Dmitrii Bulanin. ISBN 5-86007-159-0 1999. (In Russian)
11. Church of the Nativity of the Virgin Mary (16th century) from the village of Predki, Borovichi District. Available: www.novgorod.ru/read/information/cultutre/wooden-architecture/vitoslavlici/churches/christmases-virgin/ (accessed December 15, 2025) (In Russian)
12. Church of the Dormition of the Virgin Mary. Available: www.novgorod.ru/read/information/cultutre/woodenarchitecture/vitoslavlici/churches/yspeniya-virgin/ (accessed December 15, 2025) (In Russian)
13. St. Nicholas Church from the village of VysokyOstrov, Okulovsky District. Available: www.novgorod.ru/read/information/cultutre/woodenarchitecture/vitoslavlici/churches/nikolskaya-ostrov/ (accessed December 15, 2025) (In Russian)
14. Assumption Church from the village of Nikulino, Lyubytinsky District. Available: www.novgorod.ru/read/information/cultutre/woodenarchitecture/vitoslavlici/churches/yspenskaya/ (accessed December 15, 2025).
15. Nicholas Church from the village of Myakishevo. Available: www.novgorod.ru/read/information/cultutre/woodenarchitecture/vitoslavlici/churches/nikolskaya-myakishevo/ (accessed December 15, 2025) (In Russian)
16. Trinity Church from Rekon. Available: www.novgorod.ru/read/information/cultutre/woodenarchitecture/vitoslavlici/churches/troickaya/ (accessed December 15, 2025) (In Russian)
17. St. Nicholas Church from the village of Tukholi. Available: www.novgorod.ru/read/information/cultutre/woodenarchitecture/vitoslavlici/churches/nikolskaya-tuholya/ (accessed December 15, 2025).
18. Ministry of Culture of the Russian Federation. Concept for the Preservation of Wooden Architecture Monuments and Inclusion in the Cultural Circulation until 2025. Moscow, 2016. Pp. 30-32. Available: <https://culture.gov.ru/upload/iblock/877/8776838151b96355d08d3e426dbf8828.pdf> (accessed December 15, 2025) (In Russian)

Сведения об авторах

Сахарова Софья Евгеньевна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sofi.saharova@yandex.ru

Ситникова Елена Владимировна, канд. архитектуры, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, elensivtomske@yandex.ru

Authors Details

Sofia E. Sakharova, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sofi.saharova@yandex.ru

Elena V. Sitnikova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, elensivtomske@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 30.12.2025
Одобрена после рецензирования 15.01.2026
Принята к публикации 22.01.2026

Submitted for publication 30.12.2025
Approved after review 15.01.2026
Accepted for publication 22.01.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 29–46.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 29–46.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-29-46

EDN: EYCCJD

КАПИТОЛИЙ – АДМИНИСТРАТИВНЫЙ ЦЕНТР ГОРОДА ЧАНДИГАРХ (ЛЕ КОРБЮЗЬЕ, 1950–1960 ГГ.)

Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова

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

Аннотация. *Актуальность.* Индийский этап творчества французского архитектора Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), особенно его работа над административным центром города Чандигарх (штат Пенджаб, Индия), представляет собой значимый, но недостаточно систематизированный фрагмент архитектурного наследия XX в. Этот период отражает синтез модернистских принципов западной архитектуры с адаптацией к местным природно-климатическим и культурным реалиям, что делает его актуальным объектом исследования.

Цель – завершить цикл исследований «индийского» этапа творчества Ле Корбюзье путем анализа архитектурно-градостроительного ансамбля Капитолия в Чандигархе.

Результаты. Авторами проанализированы основные социально-политические и архитектурно-дизайнерские концепции Шарля-Эдуарда, заложенные в общую схему генплана Капитолия, архитектурно-композиционные и планировочные решения его семи монументальных зданий и сооружений.

Ключевые слова: Капитолий, Дворец правосудия, Парламент (Дворец Ассамблеи), Секретариат, Архитектурный колледж Чандигарха, Государственный музей и галерея искусств, монумент «Открытая рука», Башня Теней

Для цитирования: Поляков Е.Н., Полякова О.П. Капитолий – административный центр города Чандигарх (Ле Корбюзье, 1950–1960 гг.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 29–46. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-29-46. EDN: EYCCJD

ORIGINAL ARTICLE

CAPITOL – ADMINISTRATIVE CENTER OF THE CITY OF CHANDIGARH (LE CORBÜZIER, 1950–1960)

Evgenii N. Polyakov, Ol'ga P. Polyakova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. This article is devoted to architectural and urban planning activities of Charles-Édouard Jeanneret-Grie (Le Corbusier), a French architect. He created a series of plans for cities and towns, but only the plan for the city of Chandigarh (Pun-jab, India) and its administrative

center (Capitol) were implemented. The paper analyzes the main socio-political and architectural-design concepts of Charles-Édouard, laid down in the Capitol master plan and the architectural-compositional and planning solutions of its seven monumental buildings.

Keywords: Capitol, Palace of Justice, Parliament (Assembly Palace), Secretariat, Chandigarh College of Architecture, State Museum and Art Gallery, Open Hand Monument, Tower of Shadows

For citation: Polyakov E.N., Polyakova O.P. Capitol – Administrative Center of the City of Chandigarh (Le Corbuzier, 1950–1960). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 29–46. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-29-46. EDN: EYCCJD

Настоящая статья является логическим завершением цикла научных работ, посвященных «индийскому» этапу в творческой деятельности французского архитектора Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье). Мы имеем в виду статьи «Индийский этап в творчестве Ле Корбюзье. Проект города Чандигарх (1950–1960 гг.)» [1] и “Брутальные” постройки Ле Корбюзье в Ахмадабаде (Индия, 1951–1957 гг.)» [2]. В первом из этих исследований нами были рассмотрены планировочные особенности г. Чандигарх (столицы штата Пенджаб, Индия). Настоящее исследование посвящено административному центру этого города (Капитолию) и семи его основным постройкам, выполненным по проектам Ле Корбюзье и его индийских коллег и учеников.

В первую очередь рассмотрим композиционные особенности генерального плана Капитолия, включающего следующие здания и сооружения: Дворец правосудия, Парламент (Дворец Ассамблеи), Секретариат, Архитектурный колледж Чандигарха, Государственный музей и галерею искусств, монумент «Открытая рука» и Башню Теней (рис. 1).

Градостроительный ансамбль, развернутый под углом 45° к географическим меридианам, вынесен за пределы жилой части города. Он расположен у подножия Гималаев, красота которых в свое время просто поразила Шарля-Эдуарда. Этот ансамбль, включающий только правительственные здания, изначально был создан как символ власти (*греч.* Акрополь): «В него входят три монументальных здания Секретариата, Дворца правосудия и Ассамблеи, выделяющиеся на фоне остальных городских построек...» [3]. Каждое из этих зданий обладает собственным «силовым полем», не вступая в визуальное или функциональное соперничество с другими. То есть все эти постройки существуют автономно, разделенные обширными территориями, открытыми лучам палящего солнца, дождям и пылевым бурям. Кроме того, правительственный комплекс, лежащий к северо-востоку от жилого массива Чандигарха, оказался чрезмерно масштабным даже для его работников: переход от одного здания к другому занимает 10–15 мин под яростным горным солнцем. Для стороннего наблюдателя, изучающего ансамбль и его отдельные объекты на расстоянии до 800 м, восприятие также затруднено. От города этот комплекс отделен цепью холмов, а расстояние до него от наиболее удаленных городских кварталов превышает 10 км.

Поперечную ось Капитолия с юго-западной стороны замыкает здание Парламента (Законодательного собрания), а с северо-восточной – Верховный суд (Дворец правосудия): «Обращенную к северу вершину треугольника мону-

ментов должен был занять Дворец губернатора (должность его упразднена, и место предназначено музее). Более прозаичная пластина Секретариата правительства смещена за пределы основной конфигурации и расположена за объемом парламента...» [4].

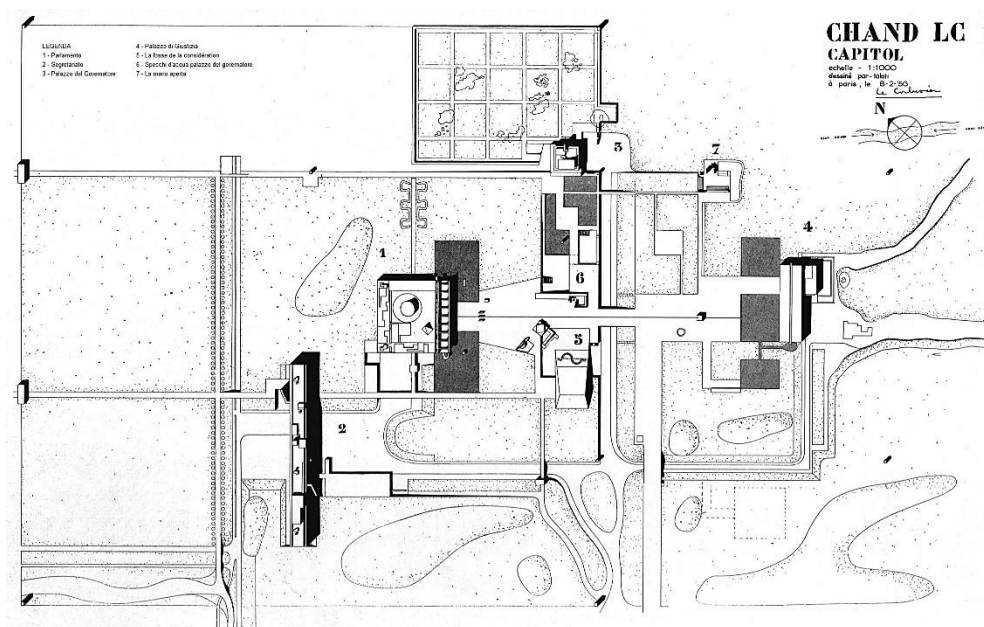


Рис. 1. Генеральный план административного центра Чандигарха (Капитолия):

1 – Парламент; 2 – Секретариат; 3 – Дворец губернаторов; 4 – Дворец правосудия с восточными пристройками; 5 – Башня Теней; 6 – Мемориал мучеников; 7 – Памятник «Открытая рука» [5]

Fig. 1. General plan of the Chandigarh Administrative Center (Capitol):

1 – Parliament; 2 – Secre-tariat; 3 – Governors' Palace; 4 – Palace of Justice with eastern annexes; 5 – Tower of Shad-ows; 6 – Martyrs' Memorial; 7 – Open Palm Monument

В целом Капитолий был осмыслен как эмблема страны, не связанная со временем. Зодчий сознательно (визуально и функционально) отделил его от города с его повседневным бытом. Как отметил Джавахарлал Неру, Чандигарх стал «храмом новой Индии... первым выражением творческого гения, расцветающего на вновь завоеванной свободе... не скованного традициями прошлого и не обремененного трудностями старых городов и старых традиций...» (Curtis W.J.R. Op. cit. P. 433) [4].

Рассмотрим архитектурно-композиционные и конструктивные особенности зданий Капитолия.

Первым сооружением на территории комплекса стал **Дворец правосудия (Верховного суда)** (1951–1955 гг.), задуманный как гигантское укрытие от дождя и солнца. Ориентированный на Капитолий фасад украшен величественным входом из трех разноцветных пилонов, поднимающихся на всю высоту здания. По правую сторону от центрального вестибюля расположены залы судебных заседаний, а по левую – находится Верховный суд (рис. 2).

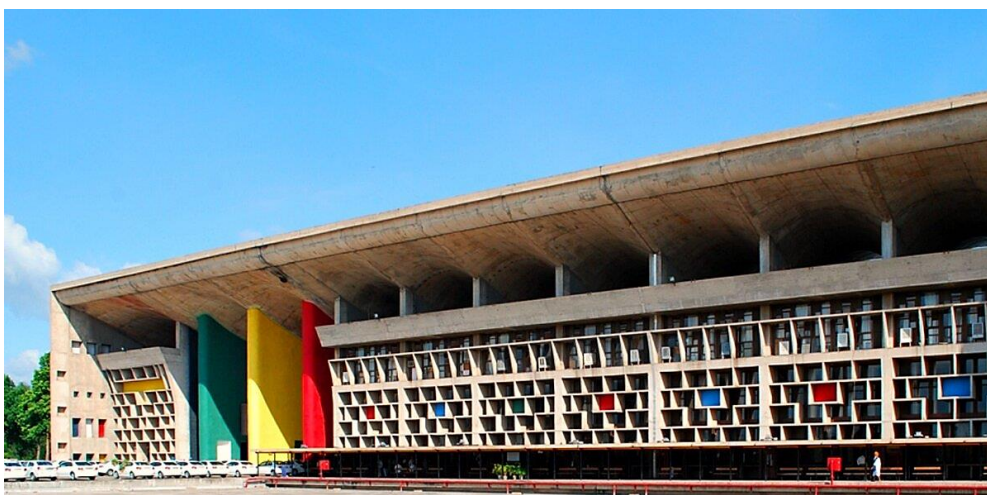


Рис. 2. Дворец правосудия (Верховного суда) (1951–1955 гг.). Видовые точки [5]
Fig. 2. Palace of Justice (Supreme Court) (1951–1955)

Над прямоугольным массивом вдоль продольной оси устроен гигантский железобетонный «зонт», поддерживаемый одиннадцатью коническими сводами. Две его продольные половины, похожие на крылья гигантской бабочки, наклонены внутрь. Они сходятся к центральному желобу, имеющему на узких торцах здания выступающие наружу водосливы. Между плоской кровлей над верхним этажом и коническими сводами оставлено продуваемое пространство. Циркуляция воздуха сквозь эту аркаду охлаждает основную призму Дворца правосудия. Своды опираются на решетчатые диафрагмы, установленные с шагом 8,4 м поперек прямоугольного плана здания.

Карнизы кровли под наклоном вынесены далеко вперед. «Парящая» над зданием кровля вместе с пространственной решеткой фасадов обеспечивают хорошую солнцезащиту. Из-за сильного перегрева основания здания к первому этажу главного фасада была пристроена веранда (рис. 2, 3).

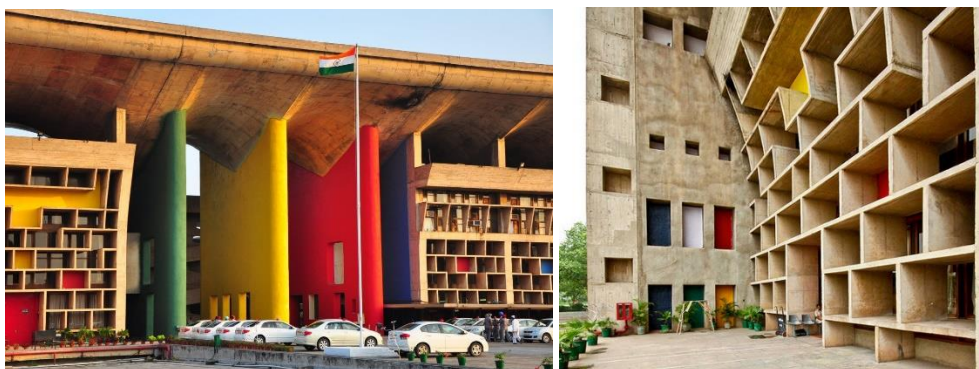


Рис. 3. Дворец правосудия (Верховного суда) (1951–1955 гг.). Решетки-солнцерезы (джали) [5]
Fig. 3. Palace of Justice (Supreme Court) (1951–1955). Sunshade grilles

Главный и тыльный фасады украшены изогнутыми наружу в верхней части массивными решетками солнцerezов (араб. «джали»). Они прикрывают снаружи рабочие помещения. Все окна в здании глубоко утоплены между бетонными перегородками, создающими спасительную тень (рис. 3, 4).



Рис. 4. Дворец правосудия (Верховного суда) (1951–1955 гг.). Тыльный фасад [5]
Fig. 4. Palace of Justice (Supreme Court) (1951–1955). Rear facade

Пластичную решетчатую структуру главного фасада пересекает по вертикали (от плиты основания до сводов «зонта») открытый портик. Сквозь пилоны этого портика, изначально окрашенные в цвета национального флага Индии (зеленый, белый и оранжевый), видна башнеобразная система пандусов с перилами из грубого бетона, соединяющая все этажи (рис. 5).



Рис. 5. Дворец правосудия (Верховного суда) (1951–1955 гг.). Входной портик (слева), внутренние пандусы, связывающие этажи (справа) [5]

Fig. 5. Palace of Justice (Supreme Court) (1951–1955). Entrance portico (left), internal ramps connecting floors (right)

Интерьеры Дворца правосудия отличаются большой изысканностью. Тому есть свои причины: «Модернизм был синонимом минимализма и низкой стоимости, что было необходимо независимой Индии. Использование ярких цветов заметно лишь в вестибюле здания Высокого суда в Чандигархе...» [5]. «Нарочито подчеркнутая массивность серых со следами опалубки бетонных стен, несмотря на отдельные элементы полихромии, угнетает. Иначе воспринимаются просторные и светлые интерьеры залов судебных заседаний, на стенах которых красуются сотканые руками кашмирских мастеров громадные яркие гобелены, созданные по рисункам Ле Корбюзье...» [Там же].

Как уже отмечалось, монументальный восьмиэтажный **Дворец Ассамблеи** (1951–1965 гг.) замыкает поперечную ось Капитолия (правительственного комплекса Чандигарха) с юго-западной стороны, а Верховного суда – Дворца правосудия – с северо-восточной [4]. Посетителей и туристов в этом здании привлекает буквально все: «Дворец Ассамблеи со всех сторон поражает как визуально, так и архитектурно, будь то гравюры на стенах, мозаичные панно или эффектная изогнутая крыша...» [6].

Главный вход оформлен длинным портиком с округлым карнизом в виде пироги (узкой длинной лодки народов Центральной и Южной Америки и Оке-

ании, выдолбленной из ствола дерева). Карниз поддерживается восемью изящными железобетонными пилонами. На плоской кровле площадью около гектара устроен сад с зелеными зонами (рис. 6).



Рис. 6. Дворец Ассамблеи (Парламента) (1951–1965 гг.) [6]

Fig. 6. Palace of Assemblies (Supreme Court) (1951–1965)

Оригинально решены и остальные фасады: «С трех других сторон ядро здания охвачено этажами офисов. Сумеречное пространство этого форума заполнено равномерной сеткой бетонных круглых колонн с грибовидным завершением, в которую врезана как самостоятельный объект высокая гиперболическая оболочка зала Ассамблеи, прорезающая плоскую кровлю и поднимающаяся на 37 м. Покрытие косо срезанного края этого подобия градирни регулирует поступление солнечного света в интерьер, захватывая зимнее солнце, отражая летнее и отбрасывая в глубь помещений солнечный луч в дни равноденствия...» [4] (рис. 7).

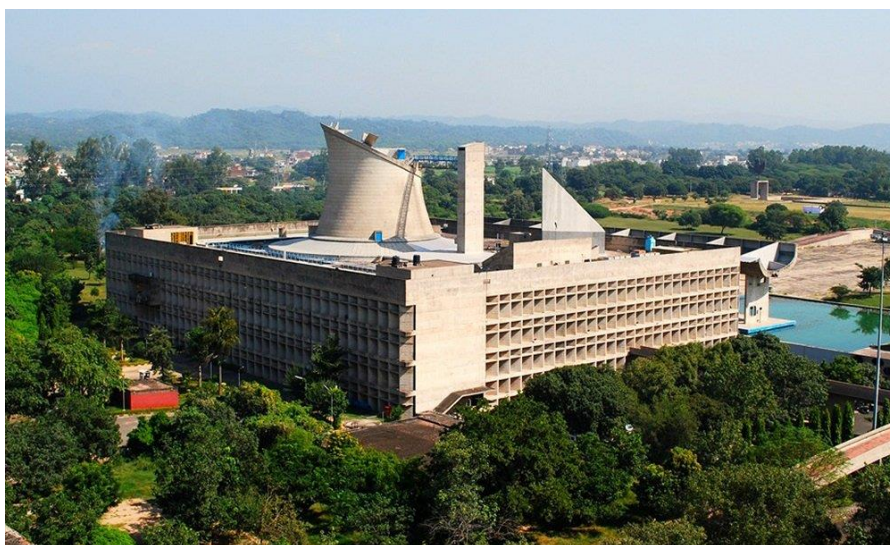


Рис. 7. Дворец Ассамблеи (Парламента) (1951–1965 гг.). Видовая точка [6]

Fig. 7. Palace of Assemblies (Supreme Court) (1951–1965)

Ле Корбюзье также решил проблему водоснабжения территории: «Когда-то в Чандигархе совсем не было воды. Вернее, она была, но на глубине восьми-десяти метров. На Капитолийском бульваре построили плотину и создали озеро. План Корбюзье категорически исключал движение моторных лодок по озеру и транспорта по огибающей его дороге, а также вечернее освещение, кроме полускрытого подсвета газонов. В ночное время в воде отражаются звезды, а днем – горы и небо... На плотине был установлен мемориальный камень со словами на четырех языках (хинди, пенджабском, урду и английском): “Создатели Чандигарха подарили это озеро и эту плотину гражданам нового города, чтобы избавить их от монотонности городской жизни и дать им возможность наслаждаться красотой природы в мире и тишине”» [4].

При проектировании Дворца собраний Ле Корбюзье консультировался с премьер-министром Неру. Видимо, поэтому монументальная входная дверь во Дворце собраний площадью почти 25 кв. футов ($\approx 2,32$ кв. м) была декорирована ярко окрашенными природными и космическими элементами, символизирующими современную Индию. В частности, здесь изображено положение Солнца в дни равноденствий и солнцестояний, а также изменение длительности дня и ночи на протяжении года (рис. 8).



Рис. 8. Панно Ле Корбюзье около главного входа во Дворец собраний (1951–1965 гг.)¹

Fig. 8. Le Corbusier's mural near the main entrance to the Palais des Congrès (1951–1965)

Ядром здания стал круглый зал для собраний и заседаний. Он расположен внутри гиперболической конструкции, пробивающей потолок дворца по-

¹ URL: <https://www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a3504-how-le-corbusier-changed-the-history-of-architecture-in-india/>

добно огромному дымоходу. Яркие контрастные элементы фасадов оживляют массивную композицию: «Лестницы и пандусы связывают террасы и балконы на разных уровнях “каменного леса” интерьера. От террасы на уровне второго этажа начинается второй “объект” – четырехгранная призма зала Советов. Она так же, как гиперboloид зала Ассамблеи, пронизывает кровлю и завершается асимметричной трехгранной пирамидой, верхушка которой обращена к гиперboloиду. Вместе они формируют символический ландшафт кровли, рукотворная геометрия которого противостоит равнине, обрамленной холмами предгорья...» [4] (рис. 9).

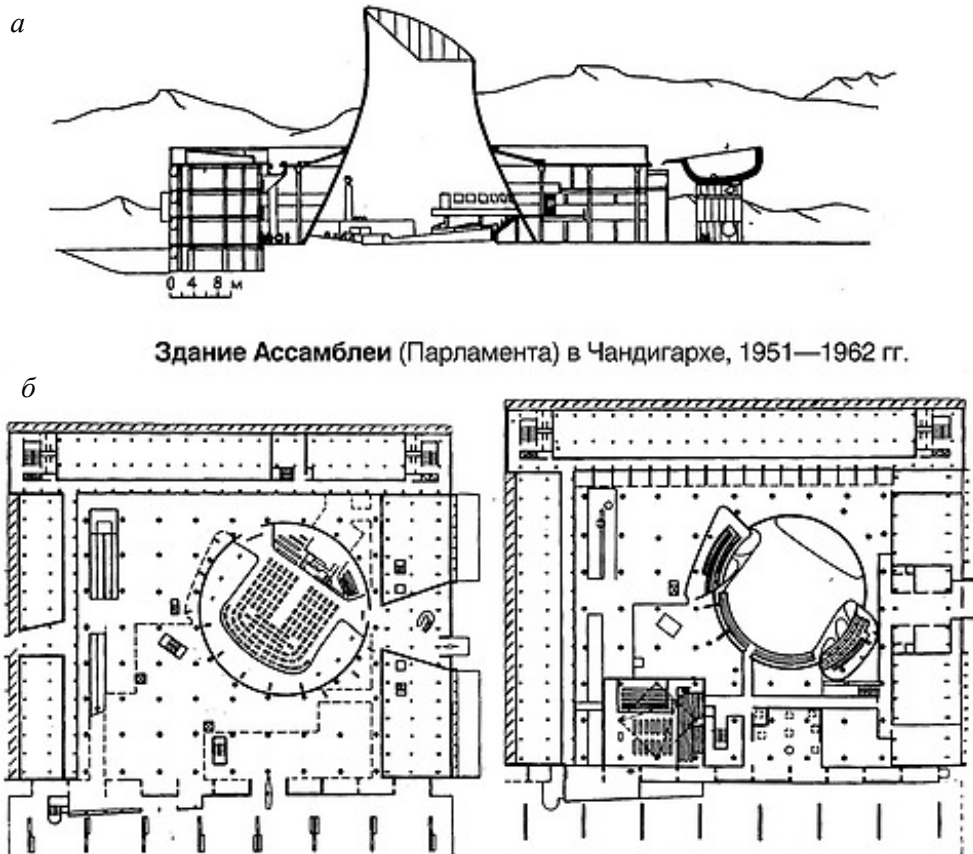


Рис. 9. Дворец собраний [7]:

a – разрез; *б* – планы

Fig. 9. Schematic of the Assembly Palace [7]:

a – cross-section; *b* – plan

Внутренняя поверхность гиперboloида декорирована «созвездиями» в виде криволинейных ярко окрашенных фигур из акустических материалов: «Регулируя звук, эта декорация в манере Ханса Арпа вряд ли способствует созданию психологической атмосферы, благоприятствующей серьезным дебатам...» [4] (рис. 10).



Рис. 10. Интерьер Актового зала (1951–1965 гг.)²
 Fig. 10. Interior of the Assembly Hall (1951–1965)

Третьим по времени строительства стало здание **Секретариата** (1951–1957 гг.) – решетчатая пластина длиной 254 и высотой 42 м, объединяющая шесть восьмиэтажных блоков, в которых размещались местные администрации Пенджаба и Харьяны: «Облик здания определяет ритм солнцезерезов большого выноса, выполненных из грубого бетона. Скульптурные пандусы, связывающие уровни, собраны в закругленные на торцах пластины, косо примыкающие к фасадам, что сообщает им направленную асимметричную дина-

² URL: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_assembly

мику. Сильную перебивку ритма, нарушающую монотонность, создает блок министерских кабинетов, проходящий через все этажи здания близ его середины. Пропорции частей решетки и расстояний между ее ритмическими акцентами выверены Модулом, созданным Ле Корбюзье. Кровле, превращенной в прогулочный сад, придан рельеф, включающий в свои очертания функциональные надстройки. Созданный таким образом мягкий асимметричный силуэт вписан в ландшафт гималайского предгорья...» [4] (рис. 11, 12).



Рис. 11. Здание Секретариата в Чандигархе (1951–1957 гг.)³
Fig. 11. Secretariat building in Chandigarh (1951–1957)



Рис. 12. Здание Секретариата в Чандигархе (1951–1957 гг.)⁴:
а – вид на здание с первого этажа; б – фасад
Fig. 12. Secretariat building in Chandigarh (1951–1957)
a – a view from the ground floor; b – facade

³ URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Secretariat_Building,Chandigarh?ysclid=mdu460xcj4443604510#/media/File:Secretariat_building.jpg

⁴ URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Secretariat_Building,Chandigarh?ysclid=mdu460xcj4443604510#/media/File:Secretariat_building.jpg

Четвертой по счету монументальной постройкой Ле Корбюзье в Чандигархе стал **Колледж искусств** (Government College of Arts (GCA), позднее преобразованный в **Архитектурный колледж** (Chandigarh College of Architecture (CCA) (1950–1965) [8] (рис. 13).



Рис. 13. Архитектурный колледж, 1950–1965 гг. Видовая точка главного фасада⁵
Fig. 13. Chandigarh College of Architecture (1950–1965)

Чандигархский архитектурный колледж – учебное заведение, основанное 7 августа 1961 г., в настоящее время осуществляет образовательную и научную деятельность в области архитектуры (рис. 14).

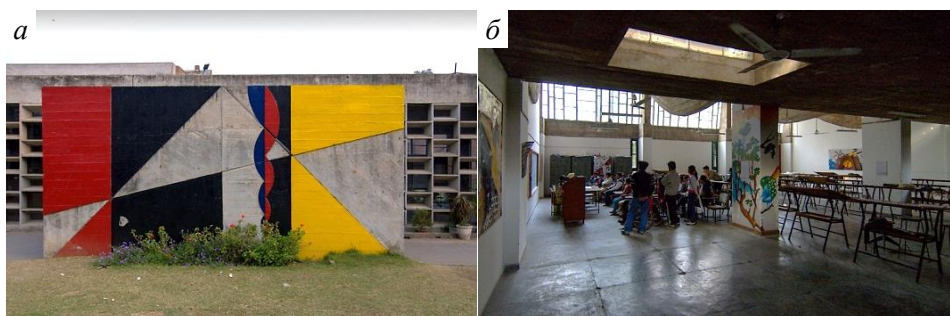


Рис. 14. Архитектурный колледж (1950–1965 гг.). Панно Ле Корбюзье около главного входа (а), интерьер учебной аудитории (б)⁶
Fig. 14. Chandigarh College of Architecture (1950–1965). Le Corbusier mural near the main entrance, interior of the lecture hall

⁵ URL: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_college

⁶ URL: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_college

Ле Корбюзье, разработавший в 1951 г. генеральный план Чандигарха, добился создания именно этого колледжа в рамках «чандигархского эксперимента». Его целью было подготовить поколение специалистов, способных реализовать современные архитектурные принципы на территории Индии. В 1962 г., когда Чандигарх стал новой столицей штата Пенджаб, школа искусств переехала на нынешнее место – в сектор 12, рядом с Государственным музеем и Художественной галереей. Первым директором и основателем колледжа в Чандигархе стал С.Л. Прашар.

Кампус занимает территорию площадью 5 акров (20 000 кв. м) и оснащен собственными площадками для крикета, баскетбола и волейбола, а также тренажерным залом. Общежитие для юношей находится в 250 ярдах (230 м) за кампусом, рядом с рынком, а общежитие для девушек – в секторе 11.

Во времена раздела Индии Ле Корбюзье и его коллеги также спроектировали в Чандигархе **Государственный музей и галерею искусств**. «Разработка этого проекта велась в 1960–1962 гг., а строительство продолжалось с 1962 по 1967 г...» [9] (рис. 15). Государственный музей и галерея искусств в Чандигархе стали одним из важнейших культурных учреждений Северной Индии. Они обаяны своим существованием разделу Британской Индии в августе 1947 г.

«Этот музей является одним из трех музеев, спроектированных Ле Корбюзье, наряду с Санскар Кендра в Ахмадабаде и Национальным музеем западного искусства в Токио. Архитектурный стиль здания отражает модернистские принципы, характерные для творчества Ле Корбюзье, с акцентом на функциональность и простоту форм... Это место сбора туристов, ученых и художников. Здесь есть зрительный зал, три выставочных уровня и библиотека. Архитектурные особенности здания отражают доминирующий в Чандигархе стиль, а фреска Сатиша Гуджрала добавляет красок...» [10] (рис. 16).



Рис. 15. Государственный музей и галерея искусств в Чандигархе (1960–1967 гг.). Видовая точка⁷
Fig. 15. State Museum and Art Gallery in Chandigarh (1960–1967)

⁷ URL: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_museum?ysclid=mdv53fuezk173370269



Рис. 16. Государственный музей и галерея искусств в Чандигархе (1960–1967 гг.). Интерьеры экспозиционных залов. Видовые точки⁸

Fig. 16. State Museum and Art Gallery in Chandigarh (1960–1967). Interiors of exhibition halls

Перед Дворцом правосудия установлен стальной монумент «Открытая рука» (Main Ouverte, Open Hand Monument, 1950–1965 гг.) – символ Чандигарха, созданный Ле Корбюзье. Это плоская металлическая конструкция, которая вращается на ветру (рис. 17).

Монумент олицетворяет мир, примирение и девиз Чандигарха «Будь готов принимать и отдавать». «Памятник высотой 26 м – не только архитектурное сооружение, но и философское высказывание об открытости и свободном обмене идеями. Ле Корбюзье использовал образ “открытой ладони” по всему городу, воплощая свое видение Чандигарха как пространства для человеческого прогресса и демократии...» [6]. Символическую скульптуру можно также рас-

⁸ URL: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_museum?ysclid=mdv53fuezk173370269

смаатривать как смысловой аналог белого голубя мира Пабло Пикассо, ставшего эмблемой Всемирного конгресса сторонников мира, проходившего с 20 по 25 апреля 1949 г. в Париже и Праге (рис. 18).



Рис. 17. Монумент «Открытая рука» над «Братской могилой». Видовые точки
Fig. 17. The Open Arm monument above the Mass Grave (1950–1965)

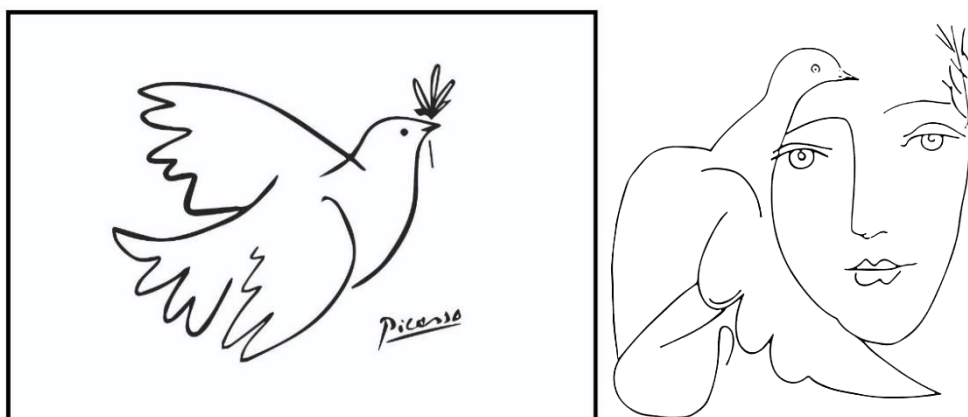


Рис. 18. Версии голубя мира Пабло Пикассо⁹
Fig. 18. Versions of Pablo Picasso's "Dove of Peace"

«Внешне тяжелый монумент постоянно находится в движении, и создается ощущение, что скоро рука-птица взмахнет крыльями и улетит в небеса. Именно постоянная игра контрастов идеально характеризует Чандигарх...» [11]. Однако сложившаяся в Пенджабе обстановка политической конфронтации сделала этот жест символически неуместным.

Последним проектом французского зодчего в Чандигархе, завершенным уже после его смерти, стала так называемая **Башня Теней** (1950–1965 гг.). Она расположена на центральной площади административно-культурного центра, ря-

⁹ URL: <https://seasons-project.ru/polet-s-golubkoj-pikasso/>

дом с Дворцом правосудия и Ассамблеей, установлена на оси север-юг и удачно структурирует открытое пространство огромной площади. Эта скульптурная конструкция была предназначена для изучения движения солнца и теней в данном регионе. Ее северная сторона полностью открыта, остальные – напоминают ажурные сетки. «В Башне Теней Ле Корбюзье вновь показывает мастерство в работе с бетоном, подтверждая свою концепцию гармонии архитектуры и природы. Сооружение предназначено для практического изучения взаимодействия архитектурного объекта и солнечного света, подтверждая тезис архитектора, что “возможно контролировать инсоляцию во всех углах здания, и даже играть с солнцем в жаркой стране и получить свет и прохладу одновременно”...» [12] (рис. 19).



Рис. 19. Башня Теней (1950–1965 гг.). Видовые точки [12]

Fig. 19. Tower of Shadows (1950–1965)

Башня создана как экспериментальная модель для изучения особенностей естественного освещения и вентиляции местных построек. Эти аспекты занимали центральное место в архитектурной философии Ле Корбюзье. «Бетонная башня спроектирована таким образом, чтобы внутри было прохладно даже в самые жаркие часы дня. Под палящим солнцем она прекрасно выполняет функцию укрытия. Это сооружение – отличный пример того, как Ле Корбюзье сочетал функциональность с формой...» [10]. Башня спроектирована таким образом, чтобы «ни один луч солнца не попадал внутрь ни под каким углом. Северная сторона башни остается открытой, потому что солнце никогда не светит с этой стороны. Архитектор использовал тот же принцип и для других зданий Капитолия, что имеет практический смысл, учитывая 30-градусную жару летом...» [12].

В завершение исследования можно выделить следующие аспекты:

1. Работая над административными зданиями Капитолия, Ле Корбюзье старался гармонично сочетать их с окружающим природным ландшафтом Индии и Пакистана и с живописными рельефами Гималаев. Ради усиления композиционного контраста он намеренно придавал своим постройкам лаконичные прямоугольные очертания.

2. Во всех проектах он успешно апробировал свои пять принципов модернистской архитектуры (круглые опорные столбы-пилоты в основаниях зданий, «свободные» планировки помещений и фасады, ленточные окна, сады на плоских кровлях). Этим принципам он обучал своих индийских коллег и учеников, для которых даже построил на территории Капитолия специализированный Архитектурный колледж.

3. Огромное значение он придавал исследованиям климатических особенностей данного региона, стараясь максимально защитить административных работников и их клиентов от чрезмерной инсоляции, жары и ураганных ветров со стороны гор и Индийского океана. Для этого Ле Корбюзье сочетал старинные традиции индийской архитектуры (защитные козырьки-маркизы и решетчатые окна-жалюзи, «висячие сады», бассейны вблизи фасадов и на кровлях зданий) с инновационными решениями (грубая фактура железобетонных вентилируемых конструкций, помогающая рассеивать солнечные лучи и обеспечивать прохладу внутри зданий). С этой целью он даже построил уникальную экспериментальную модель Башни Теней.

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. № 4. С. 9–19. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-9-19. EDN: BIJYZF
2. 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
3. Чандигарх: идея через пятьдесят лет // PORT Russia. URL: <https://port-magazine.ru/architecture/chandigarh/> (дата обращения: 10.11.2025).
4. Иконников А.В. Ле Корбюзье в Индии // Архитектура XX века. Утопии и реальность. Том I. Москва : Прогресс-Традиция, 2001. URL: https://corbusier.totalarch.com/andrew_ikonnikov/3
5. Дворец Юстиции (Palace of Justice), Чандигарх, Индия. 1951–1955 // Totalarch. URL: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_palace_justice?ysclid=me48wjlq81691970034 (дата обращения: 05.11.2025).
6. How Le Corbusier changed the history of architecture in India // Re-Thinking The Future. URL: <https://www.re-thinkingthefuture.com/know-your-architects/a3504-how-le-corbusier-changed-the-history-of-architecture-in-india/> (дата обращения: 05.11.2025).
7. Вахрушева Л.Л. История дизайна, науки и техники. Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2007. 88 с. С. 39–42.
8. Колледж искусств (Government College of Arts (GCA) и Архитектурный колледж (Chandigarh College of Architecture (CCA), Чандигарх, Индия. 1950–1965 // Totalarch. URL: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_college (дата обращения: 05.11.2025).
9. Architectural Works of Le Corbusier in India // Pothi. Talking Art. URL: <https://www.abirpothi.com/5-architectural-works-of-le-corbusier-in-india/> (дата обращения: 15.11.2025).
10. Федосеев Н.К. Государственный музей и галерея искусств Чандигарха: история, коллекция и значение // Музей. 2025. № 3. URL: <https://panor.ru/articles/gosudarstvennyy-muzey-i-galereya-iskusstv-chandigarkha-istoriya-kollektsiya-i-znachenie/111196.html?ysclid=mdwkk1q4lw101336965#> (дата обращения: 15.11.2025).
11. Троицкая М. Чандигарх – город в Индии, который с нуля построили Ле Корбюзье и Пьер Жаннере // Perito. URL: <https://perito.media/posts/india-chandigarh?ysclid=mb1tvuacq9726864557> (дата обращения: 15.11.2025).
12. Башня Теней (Tower of Shadow), Чандигарх (Chandigarh), Индия. 1950–1965 // Totalarch. URL: http://corbusier.totalarch.com/chandigarh_tower_shadow (дата обращения: 10.11.2025).

REFERENCES

1. Polyakov E.N., Polyakova O.P. Indian Stage in Creative Activity of Le Corbusier. Chandigarh-City Project (1950–1960). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (4): 9–20. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-9-19. EDN: BIJYZF (In Russian)
2. Polyakov E.N., Polyakova O.P. Le Corbusier's Brutalist Buildings in Ahmadabad (India, 1951–1957). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Jour-*

- nal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (5): 9–35. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-64-87. EDN: FRGMLO (In Russian)
3. Chandigarh: an idea in fifty years. Available: <https://port-magazine.ru/architecture/chandigarh/> (In Russian)
 4. *Ikonnikov A.V.* Le Corbusier in India. Available: https://corbusier.totalarch.com/andrew_ikonnikov/3?ysclid=mdqt17v4v2579101632 (In Russian)
 5. Palace of Justice, Chandigarh, India (1951–1955). Available: https://corbusier.totalarch.com/chandigarh_palace_justice?ysclid=me48wjlq81691970034 (In Russian)
 6. How Le Corbusier changed the history of architecture in India. Available: www.re-thinking-the-future.com/know-your-architects/a3504-how-le-corbusier-changed-the-history-of-architecture-in-india/
 7. *Vakhrusheva L.L.* History of Design, Science and Technology. Vladivostok, 2007. Pp. 39–42. (In Russian)
 8. Government College of Arts (GCA) and Chandigarh College of Architecture (CCA), Chandigarh, India. 1950–1965. Available: http://corbusier.totalarch.com/chandigarh_college
 9. 5 architectural works of Le Corbusier in India. Available: www.abirpothi.com/5-architectural-works-of-le-corbusier-in-india/
 10. *Fedoseev N.K.* Chandigarh State Museum and Art Gallery: History, collection, and significance. Available: <https://panor.ru/articles/gosudarstvennyy-muzey-i-galereya-iskusstv-chandigarkh-istoriya-kollektsiya-i-znachenie/111196.html?ysclid=mdwkk1q4lw101336965#> (In Russian)
 11. *Troitskaya M.* Chandigarh is a city in India that was built from scratch by Le Corbusier and Pierre Jeanneret. Available: <https://perito.media/posts/india-chandigarh?ysclid=mb1tvuacq9726864557> (In Russian)
 12. Tower of Shadow, Chandigarh, India, 1950–1965. Available: http://corbusier.totalarch.com/chandigarh_tower_shadow

Сведения об авторах

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

Полякова Ольга Павловна, канд. экон. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, oppopp2010@yandex.ru

Authors Details

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

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

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 03.10.2025
Одобрена после рецензирования 25.10.2025
Принята к публикации 22.01.2026

Submitted for publication 03.10.2025
Approved after review 25.10.2025
Accepted for publication 22.01.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 47–56.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 47–56.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-47-56

EDN: FQLXPA

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Хашими Сайед Вахидулла

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

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена кризисом устаревшей образовательной инфраструктуры, которая не соответствует современным педагогическим требованиям, цифровым реалиям и потребностям социализации учащихся.

Цель работы заключается в разработке принципов формирования архитектуры школьных зданий нового поколения, отвечающих трансформации образовательных парадигм, требованиям гибкости, функциональности, устойчивого развития и создания инклюзивной, безопасной и стимулирующей познание среды.

Методы. В настоящем исследовании применяется анализ существующих теоретических и практических изысканий, научной литературы, публикаций, посвященных взаимодействию педагогической и архитектурной практики, а также рассмотрение конкретных примеров реализованных школьных зданий.

Результаты. Архитектура школ нового поколения трансформирует их из типовых заведений в многофункциональные общественно-образовательные центры, где среда прямо влияет на обучение и развитие. Эта среда строится на принципах открытости и трансформируемости пространств, интеграции с городом, инклюзивности и безопасности. Ее дополняют экологичность, передовые технологии для гибкого обучения и вдохновляющая архитектура. В совокупности это создает уникальную экосистему, способствующую воспитанию критического мышления, креативности и кооперации у нового поколения.

Ключевые слова: архитектура, пространство, гибкость, технология, устойчивость, развитие, принципы, школа, педагогика, образование

Для цитирования: Хашими Сайед Вахидулла. Принципы формирования архитектуры школьных зданий нового поколения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 47–56. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-47-56. EDN: FQLXPA

ORIGINAL ARTICLE

FORMATION PRINCIPLES OF NEW GENERATION SCHOOL BUILDING ARCHITECTURE

Hashimi Sayed Wahidullah

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Abstract. *Purpose:* The aim of this work is to develop design principles of new-generation school buildings that respond to the transformation of educational paradigms and the require-

ments of flexibility, functionality, sustainable development, and the creation of an inclusive, safe, and stimulating learning environment.

Methodology/approach: The analysis of existing theoretical and practical research, scientific literature, and publications in the field the interaction between pedagogical and architectural practice, a review of specific examples of completed school buildings.

Research findings: The architecture of new-generation school buildings transforms them from typical institutions to multifunctional public education centers, where the environment directly influences learning and development. This environment is based on the principles of openness and transformability of spaces, integration with the city, inclusiveness, and safety. It is complemented by environmental friendliness, advanced technologies for flexible learning, and inspiring architecture. Together, this creates a unique ecosystem that fosters critical thinking, creativity, and cooperation in the new generation.

Keywords: architecture, space, flexibility, technology, sustainability, development, principles, school, pedagogy, education

For citation: Hashimi Sayed Wahidullah. Formation Principles of New Generation School Building Architecture. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 47–56. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-47-56. EDN: FQLXPA

Введение

Архитектура образовательных пространств больше не является просто фоном для обучения, она превратилась в динамичного и активного участника педагогического процесса. Принципы, определяющие формирование школьных зданий нового поколения, представляют собой фундаментальный отход от индустриальной модели с одинаковыми классами, выстроенными вдоль длинных безликих коридоров. Актуальность работы связана с переходом от устаревшей коридорной модели школы к гибкой и многофункциональной образовательной среде. Она должна быть трансформируемой, технологичной и комфортной, чтобы отвечать задачам современного образования. Сегодня школа задумывается как живая, гибкая и отзывчивая экосистема, созданная для воспитания навыков и мышления, необходимых в XXI в., – сотрудничества, креативности, критического мышления и адаптивности. Эта новая архитектурная философия строится на нескольких ключевых принципах, которые тесно переплетаются, создавая вдохновляющую и функциональную среду.

В основе этой новой парадигмы лежит принцип гибкости и адаптивности. Статичный узкоспециализированный класс заменяется разнообразием учебных сред. Раздвижные стены, складные перегородки и модульная мебель позволяют легко трансформировать пространства для самостоятельной работы, совместной деятельности в малых группах или занятий с большим количеством учащихся. Эта текучесть дает педагогам возможность подстраивать среду под учебную задачу, а не наоборот. Само здание становится обучающим инструментом, показывая ученикам, что перемены – это постоянная величина, а пространства, как и знания, можно преобразовывать для новых целей. Это распространяется на дизайн всего здания, включая разборные стены и адаптируемые инженерные коммуникации, что позволяет проводить будущую реконфигурацию без капитального ремонта, гарантируя, что школа сможет развиваться вместе с меняющимися образовательными потребностями [1].

Эта гибкость неразрывно связана с созданием разнообразных и инклюзивных образовательных ландшафтов. Вместо монотонной череды комнат школы нового поколения предлагают богатую палитру пространств. Здесь есть шумные открытые учебные плазы для коллективных проектов, тихие уголки и ниши для концентрации, оснащенные технологиями мастерские для практического творчества и комфортные неформальные зоны для отдыха, которые поощряют спонтанные обсуждения и социальное обучение. Это разнообразие признает, что каждый школьник учится по-своему, и предоставляет автономию для выбора среды, которая наилучшим образом соответствует его когнитивному и эмоциональному состоянию. Архитектура активно поддерживает принципы универсального дизайна в обучении, обеспечивая, чтобы доступность была не второстепенной мыслью, а фундаментальным элементом, создающим среду, где каждый ученик, независимо от физических или когнитивных способностей, может преуспевать.

Кроме того, школа нового поколения тесно связана с сообществом и окружающей средой. Традиционная школа уступает место более проницаемому и интегрированному учреждению. Общественные центры, общие библиотеки, актовые залы и спортивные сооружения размывают границы между школой и районом, превращая ее в центр непрерывного обучения для людей всех возрастов. С экологической точки зрения само здание служит наглядным уроком устойчивого развития. Принципы биодизайна занимают центральное место: обилие естественного света, вентиляция, озеленение и натуральные материалы помогают снижать стресс и улучшать самочувствие. Использование возобновляемых источников энергии, сбор дождевой воды и видимые экологичные системы наглядно обучают ответственному отношению к окружающей среде, делая здание трехмерным учебником по экологической грамотности.

Данное пространство сосредоточено на благополучии и взаимосвязи учащихся. Дизайн уделяет первостепенное внимание человеку-ориентированным элементам: акустике, снижающей шумовое загрязнение, качеству воздуха, способствующему здоровью, и доступу к видам и природе, уменьшающим умственную усталость. Угнетающий коридор с классами по обеим сторонам превращается в учебную улицу или авеню – широкий, наполненный естественным светом проход, который функционирует как социальный и совместный позвоночник, соединяющий различные учебные зоны и поощряющий движение и общение. Прозрачность является ключевым инструментом в этом начинании: активное использование стеклянных стен создает ощущение открытости, позволяет свету проникать вглубь здания и создает визуальные связи, способствующие культуре доверия и включенности, делая процесс обучения видимым [2, 3].

Значимость исследования заключается в демонстрации того, что целенаправленно спроектированная образовательная среда выполняет роль третьего учителя, что способствует повышению качества образования, улучшению благополучия учащихся и активизации участия сообщества, одновременно формируя ключевые навыки XXI в. и принципы инклюзивности.

По своей сути архитектура школы нового поколения – это осознанный и продуманный ответ на новую образовательную реальность. Она выходит за

рамки простого размещения образования, чтобы активно способствовать ему, создавая целостную, адаптивную и человеко-центричную среду, которая готовит учеников не только к экзаменам, но и к жизни.

Основные принципы

Гибкость. Принцип гибкости является основополагающим для формирования архитектуры зданий школ нового поколения, которые отходят от жесткой модели классов-сот и коридоров прошлого в сторону динамичных сред, способных адаптироваться к развивающимся педагогическим подходам и потребностям общества.

Эта концепция выходит за рамки просто раздвижных стен, охватывая целостную философию проектирования, в которой пространство, мебель, технологии и инфраструктура задуманы как переконфигурируемые, многофункциональные и отзывчивые.

Основная идея заключается в создании образовательного ландшафта, который поддерживает разнообразие методов обучения – от прямого инструктажа до совместного проектного обучения и самостоятельной работы, а также защищает здание от будущих изменений в учебных планах или технологиях.

Ярким воплощением этого принципа является гимназия Эрестад в Копенгагене (рис. 1), Дания. Здесь сама архитектура служит инструментом обучения, организованным вокруг обширного открытого центрального атриума, который заменяет традиционные закрытые классы.

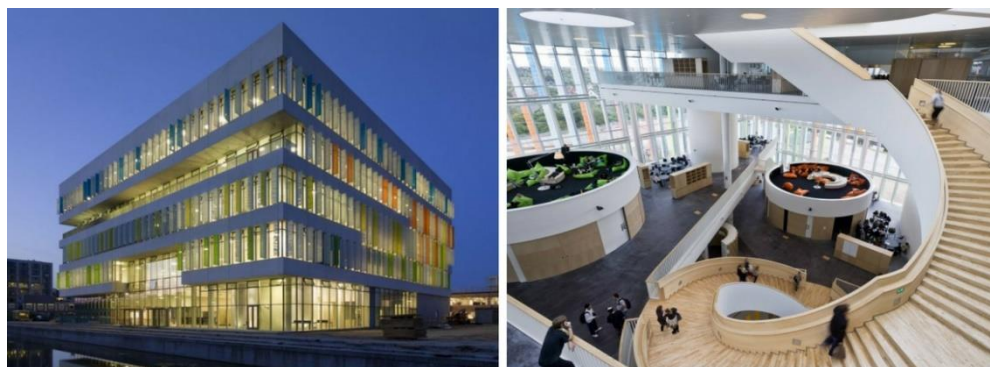


Рис. 1. Гимназия Эрестад¹

Fig. 1. Erestad Gymnasium

Это центральное пространство, названное учебной зоной, представляет собой гибкую среду, наполненную разнообразной мебелью – от мягких сидений и высоких стоек до закрытых капсул и открытых столов для совместной работы, что позволяет ученикам и учителям формировать и переформировывать группы в зависимости от поставленной задачи.

Отсутствие фиксированных стен способствует прозрачности, междисциплинарному сотрудничеству и ощущению наличия учебного сообщества, в то

¹ URL: https://vk.com/wall-129590705_87?ysclid=mkfs1x42pk397905615&z=photo-129590705_436068420%2Fwall-129590705_87

время как более мелкие акустически изолированные зоны «домашней базы» предоставляют необходимое пространство для концентрации. Вся структура поддерживается мощной беспроводной технологией и легкодоступными источниками питания, обеспечивая автономность учебного процесса.

Этот дизайн воплощает гибкость не как второстепенную мысль, а как свою основополагающую этику, создавая экосистему, в которой среда может постоянно преобразовываться ее пользователями для поддержки спонтанного, совместного и высоко персонализированного образовательного опыта, определяющего новое поколение обучения [4].

Устойчивое развитие. Проектирование зданий школ нового поколения основывается на принципах устойчивого развития, превращая их из пассивных сооружений в активные трехмерные учебные центры. Такой комплексный подход сочетает в себе экологические, социальные и экономические аспекты, создавая педагогически насыщенные и устойчивые здания.

Наиболее заметным аспектом является экологическая стратегия. Биоклиматический подход использует ориентацию, форму и оболочку здания для адаптации к местным климатическим условиям. Такие элементы, как стратегическое затенение, высокоэффективная изоляция и герметичная конструкция, сводят к минимуму потребность в энергии. Сниженный спрос на энергию затем покрывается за счет возобновляемых источников, таких как солнечные панели, с целью достижения нулевого энергопотребления [5].

Экономия воды достигается за счет сбора дождевой воды и рециркуляции серой воды, а при выборе материалов предпочтение отдается местным, нетоксичным и переработанным ресурсам, чтобы снизить углеродный след и обеспечить здоровый воздух в помещении.

Эти экологические особенности непосредственно используются в социальных и образовательных целях. Здание функционирует как живая лаборатория с открытыми инженерными системами и дисплеями, показывающими расход энергии в реальном времени. Школьники изучают экологию и физику через прямое взаимодействие с функциями здания, развивая глубокое понимание принципов устойчивого развития.

Дизайн также уделяет первостепенное внимание благополучию людей, обеспечивая обилие естественного света, связь с открытыми пространствами и гибкие, инклюзивные зоны, которые поддерживают различные стили обучения и использование школы сообществом после занятий.

Такой фокус на устойчивости гарантирует долгосрочную экономическую жизнеспособность [6]. Применение прочных материалов, не требующих сложного обслуживания, позволяет существенно сократить будущие эксплуатационные затраты. Одновременно создание здоровой образовательной среды способствует повышению успеваемости учащихся и снижению текучести педагогических кадров (удержанию квалифицированных преподавателей).

Такие решения обеспечивают значимый долгосрочный эффект: совокупные социальные и экономические выгоды со временем многократно превосходят первоначальные вложения в строительство или реконструкцию школы.

В этой модели само школьное здание становится самым глубоким уроком устойчивого развития, демонстрируя, как удовлетворять потребности настоящего, не ставя под угрозу будущее [7].

Это достигается за счет бесшовного интегрированного дизайна. Основные пути перемещения ясны и интуитивно понятны, а лестницы, лифты и рампы представляют собой равноправные и привлекательные варианты. Пространства предлагают разнообразие: от открытых общих зон до тихих уголков для сенсорной разгрузки. Сенсорная среда имеет первостепенное значение для комфорта и навигации: используются естественное освещение, продуманная акустика и тактильные материалы [8].

Можно отметить, что школа Vittra School Telefonplan (рис. 2, 3) в Стокгольме переосмысливает архитектуру учебных заведений, разрушая как физические, так и метафорические стены. Ее дизайн – это яркая декларация инклюзивности, создающая текучий ландшафт для обучения, а не жесткое учреждение. В отсутствие традиционных классов открытое пространство растворяет барьеры, позволяя ученикам свободно перемещаться и находить свой собственный идеальный для обучения контекст. Эта свобода выбора является фундаментальной, удовлетворяя разнообразные потребности в сотрудничестве, концентрации или уединенном размышлении.



Fig. 2. Ground floor of Vittra School Telefonplan

Пространство школы представляет собой калейдоскоп уникальных зон: от «пещеры» для сосредоточенной индивидуальной работы до «горы» для со-

² URL: <https://www.archdaily.com/202358/vittra-telefonplan-rosan-bosch>

браний и социальных игр, гарантируя, что каждый ученик, независимо от своего стиля обучения или настроения, сможет найти место, где он чувствует себя комфортно. Здесь сама архитектура становится активным участником образовательного процесса, способствуя развитию самостоятельности, случайным встречам и глубокому чувству общности, где никто не оказывается на обочине из-за универсальной, подходящей ко всем среды.



Рис. 3. Интерьер Vittra School Telefonplan³
Fig. 3. Interior of Vittra School Telefonplan

Интеграция технологий. Внедрение технологий перестало быть просто дополнительной функцией и стало центральной нервной системой зданий школ нового поколения, коренным образом преобразуя их архитектуру от статичного контейнера до динамичного, активного участника образовательного процесса. Такая глубокая интеграция выходит за рамки аппаратного обеспечения, трансформируя саму логику здания и создавая отзывчивые и адаптируемые учебные экосистемы.

Этот переход обеспечивает новую пространственную гибкость. Жесткая ячеистая модель классов сменяется открытыми, трансформируемыми образовательными ландшафтами. Эту гибкость поддерживает встроенная технологическая инфраструктура: повсеместная беспроводная связь, подача электроэнергии через напольные люки и потолочные модули, а также мобильные перегородки. Мебель со встроенными источниками питания и простыми надежными соединениями позволяет произвольно менять планировку, превращая архитектуру в каркас для обучения, который адаптируется к ежедневным потребностям.

³ URL: <https://www.archdaily.com/202358/vittra-telefonplan-rosan-bosch>

Технологии также меняют качество окружающей среды в школе. Строительная оболочка становится интеллектуальной, где датчики передают данные в систему управления зданием, которая оптимизирует освещение, температуру и качество воздуха, что создает устойчивую, здоровую и комфортную среду. Эти данные также можно использовать в качестве живой лаборатории для обучения учащихся. Кроме того, цифровые дисплеи, интегрированные в стены и общие зоны, демонстрируют работы и предоставляют информацию, стирая грань между физическим пространством и цифровой идентичностью.

Что наиболее важно, эта интеграция размывает физические и концептуальные границы школы. Видеоконференции высокой четкости и иммерсивные технологии, такие как VR/AR, становятся архитектурно предусмотренными элементами. Специализированные глобальные классы обеспечивают беспрепятственное сотрудничество с внешним миром, в то время как AR и VR создают безграничные возможности для экспериментального обучения. Таким образом, школа превращается из изолированной цитадели в соединенный узел глобальной сети.

В этой новой парадигме архитектура и ее интегрированные технологии неразрывно слиты. В результате создается отзывчивая, устойчивая и ориентированная на человека среда, предназначенная для развития вместе с будущим самого образования [9, 10].

Заключение

Новейшие исследования архитектуры школьных зданий нового поколения свидетельствуют о явном отходе от стандартизированных коридорных моделей прошлого в сторону динамичных, гибких и ориентированных на человека образовательных сред. Ключевые выводы указывают на то, что успешный современный школьный дизайн фундаментально обусловлен педагогической философией, где сама архитектура становится активным участником учебного процесса.

Основная цель заключается в проектировании гибких, адаптируемых образовательных пространств. Такие среды должны быть универсальными и поддерживать широкий спектр активностей: от групповых проектов и самостоятельной работы до творческих практикумов и взаимодействия в цифровой среде. Это достигается за счет открытых, текучих планировок, прозрачных границ, способствующих визуальной связи и чувству общности, и бесшовной интеграции технологий как инструмента, а не отвлечения. Кроме того, глубокая приверженность устойчивому развитию и биодизайну гарантирует, что эти здания не только энергоэффективны, но и укрепляют благополучие жильцов, восстанавливая связь с природой и обеспечивая доступ к обилию естественного света и воздуха.

В выводах подчеркивается, что школы нового поколения должны быть глубоко интегрированы в свое сообщество, функционируя как центр непрерывного обучения и социальной активности за пределами традиционных школьных часов. Это требует надежной интеграции технологий как неотъемлемого элемента обучения и приверженности устойчивому развитию, выходящему за рамки энергоэффективности, чтобы создать здоровую, жизнестойкую и вдохновляющую среду.

Успешное формирование этой новой архитектурной типологии зависит от совместного междисциплинарного процесса проектирования с вовлечением педагогов, архитекторов, учащихся и сообщества с самого начала, что гарантирует следующее: конечное здание будет не просто контейнером для образования, а важным и активным участником подготовки учеников к неопределенному будущему.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маметаева Д.Р. Формирование современной концепции архитектурно-планировочной организации школьного здания // Н О Э М А | Н О Н М А. 2019. № 2 (2). С. 223–226.
2. Яковенко Н.Е. Современные требования к проектированию школ // Национальная академия природоохранного и курортного строительства. 2019. № 6. С. 40–44.
3. Батсук С., Урнухбаяр У. Актуальные проблемы при строительстве школьных зданий // Символ науки. 2017. № 12. С. 155–156.
4. Шурьгин Д.М. Современная школа для гармоничного развития личности // Жилищное строительство. 2007. № 11. С. 32–33.
5. Nair P., Fielding R. The language of school design : design patterns for 21st century schools. DesignShare, 2009. 122 p.
6. Булгакова Е.А. Совершенствование архитектуры школьных зданий в аспекте развивающей образовательной среды // Вестник МИТУ-МАСИ. 2018. № 4. С. 16–19.
7. Куваева Я.В. Архитектура школы будущего: среда обучения // Школьные технологии. 2011. № 4. С. 124–128.
8. Нурмухаметов В.В. Современные тенденции в архитектуре образовательных учреждений на примере зарубежного опыта // Вестник магистратуры. 2021. № 1–4 (112). С. 36–38.
9. Dovey K., Fisher K. Designing for adaptation: the 10. school as socio-spatial assemblage // Journal of Architecture. 2014. № 19 (1). P. 43–63.
10. Gislason N. Architectural design and the learning environment: A framework for school design research // Learning Environments Research. 2010. № 13 (2). P. 127–145.

REFERENCES

1. Mametaeva, D.R. Formation of a Modern Concept for the Architectural and Planning Organization of a School Building. *NOEMA*, 2019; 2 (2): 223–226. (In Russian)
2. Yakovenko N.E. Modern Requirements for School Design. In: *National Academy of Environmental Protection and Resort Construction*. 2019; (6): 40–44. (In Russian)
3. Batsukh Sarangerel, Urnukhbayar Unubold. Current Problems in the Construction of School Buildings. *Simvol nauki*. 2017; (12): 155–156. (In Russian)
4. Shurygin D.M. A Modern School for the Harmonious Development of the Individual. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2007; (11): 32–33. (In Russian)
5. Nair P., Fielding R. The Language of School Design: Design Patterns for 21st Century Schools. Designshare, 2009. 122 p.
6. Bulgakova E.A. Improving the Architecture of School Buildings in the Aspect of a Developmental Educational Environment. *Vestnik MITU-MASI*. 2018; (4): 16–19. (In Russian)
7. Kuvaeva Y.V. Architecture of the School of the Future: The Learning Environment. *Shkol'nye tekhnologii*. 2011; (4): 124–128. (In Russian)
8. Nurmukhametov V.V. Modern Trends in the Architecture of Educational Institutions Based on Foreign Experience. *Vestnik magistratury*. 2021; 1–4 (112): 36–38. (In Russian)
9. Dovey, K., Fisher, K. Designing for Adaptation: The School as Socio-Spatial Assemblage. *Journal of Architecture*. 2014; 19 (1): 45–46.
10. Gislason N. Architectural Design and the Learning Environment: A Framework for School Design Research. *Learning Environments Research*. 2010; 13 (2): 127–145.

Сведения об авторе

Хашими Сайед Вахидулла, аспирант, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 117198, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, s.wahidullah1@gmail.com

Author Details

Hashimi Sayed Wahidullah, Research Assistant, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 6, Miklukho-Maklaya Str., 117198, Moscow, Russia, s.wahidullah1@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11.10.2025
Одобрена после рецензирования 24.11.2025
Принята к публикации 13.01.2026

Submitted for publication 11.10.2025
Approved after review 24.11.2025
Accepted for publication 13.01.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 57–69.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 57–69.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 728.54

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-57-69

EDN: GKVHRM

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ ЭКОТУРИЗМА В ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДЬЯХ ИРАКА

Али Хусейн Шани Аль-Самаветли

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

Аннотация. Актуальность исследования определяется реализацией правительственной программы возрождения южных регионов Ирака, включающих знаменитые Месопотамские болота, которые обладают уникальной экосистемой и культурной значимостью для развития экотуризма. В то же время существует дефицит теоретических разработок, направленных на поиск инновационных методов и гибких пространственных и функциональных моделей, способствующих формированию устойчивого экотуризма с учетом специфики водно-болотного ландшафта данного региона.

Цель статьи – предложить ключевые подходы к проектированию и адаптивные модели формообразования объектов экотуризма с учетом сохранения биоразнообразия болот, традиционного образа жизни местных общин.

В качестве *методической базы* исследования принимаются принципы «зеленой архитектуры», включающие принцип биоинтеграции, композиционных связей, ландшафтных автономий, энергоэффективности. Принципы определяют методы органичного взаимодействия объектов инфраструктуры экотуризма с компонентами водно-болотного ландшафта и позволяют минимизировать воздействие на природу.

Полученные *результаты* включили следующие положения: 1. Классификацию областей водно-болотного ландшафта Ирака. 2. Авторскую «дорожную карту» по реализации стратегии формирования туристических комплексов на водно-болотных угодьях, включая подходы к их проектированию: биоклиматическое проектирование, экологически адаптивное, модульное и мобильное проектирование, социально ориентированное проектирование и природосберегающее зонирование; использование локальных технологий традиционного строительства. 3. В рамках намеченной стратегии определены разновидности построек для туристов на водно-болотных угодьях; по способу архитектурного формообразования предложен ряд частных архитектурно-типологических моделей объектов экотуризма: плавающие структуры; возвышенные конструкции; объекты-прототипы; встроенные и интегрированные объекты; временные сборно-разборные конструкции. 4. Предложена модель автономного туристического комплекса, а также график его проектной реализации и строительства.

В рамках исследования были заложены основы комплексного подхода к развитию экотуризма в водно-болотных угодьях Ирака, который учитывает экологические, архитектурные и социально-экономические аспекты и включает стратегию, адаптивные частные подходы и методы проектирования и выбора оптимальных архитектурных моделей объектов экотуризма.

Ключевые слова: водно-болотные угодья, экотуризм, зеленая архитектура, адаптивные подходы, архитектурно-типологические модели

Для цитирования: Аль-Самаветли А.Х.Ш., Скопинцев А.В. Подходы к проектированию объектов экотуризма в водно-болотных угодьях Ирака // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 57–69. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-57-69. EDN: GKVHRM

ORIGINAL ARTICLE

**DESIGN APPROACHES TO ECOTOURISM FACILITIES
IN IRAQ WETLANDS****Ali Hussein Shani Al-Samawetli***Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

Abstract. The relevance of this study is determined by the implementation of a government program to revive the southern regions of Iraq, including the renowned Mesopotamian Marshes, which possess a unique ecosystem and cultural significance for the development of ecotourism. At the same time, there is a lack of theoretical research aimed at identifying innovative methods and flexible spatial and functional models that facilitate the development of sustainable ecotourism, taking into account the specific features of the wetland landscape of this region.

Purpose: The aim of this article is to propose design approaches and adaptive models for the formation of ecotourism facilities, taking into account the conservation of wetland biodiversity and the traditional life of local communities.

Green architecture principles are adopted as the methodological basis, including biointegration, compositional relationships, landscape autonomy, and energy efficiency. These principles define the organic interaction of ecotourism infrastructure with wetland landscape components and help to minimize environmental impacts.

Research findings: 1) classification of the wetland landscape of Iraq, 2) the author's roadmap for the strategy implementation of tourist complexes in wetlands, including approaches to their design: bioclimatic design, environmentally adaptive, modular and mobile design, socially oriented design and nature-preserving zoning; the use of local technologies of traditional construction, 3) types of buildings for tourists in wetlands; specific architectural and typological models of ecotourism objects: a) floating structures; b) elevated structures; c) prototype objects; d) built-in and integrated objects; d) temporary prefabricated structures; 4) autonomous tourist complex and a schedule for its design implementation and construction.

Value: Foundations are laid for the integrated approach to ecotourism development in Iraq's wetlands. This approach takes into account environmental, architectural, and socioeconomic aspects and includes strategy; adaptive, specific approaches, design and selection of optimal architectural models for ecotourism facilities.

Keywords: wetlands, ecotourism, green architecture, adaptive approaches, architectural typological models

For citation: Al-Samawetli A.H.Sh., Skopintsev A.V. Design Approaches to Ecotourism Facilities in Iraq Wetlands. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 57–69. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-57-69. EDN: GKVHRM

Введение

Строительство экотуристических комплексов в водно-болотных угодьях (ВБУ) Ирака, особенно в болотах Месопотамии, представляет собой уникальную возможность сбалансировать охрану окружающей среды и устойчивое развитие туристического сектора в экономике. В этой связи разработка теоретиче-

ских подходов и реализация адаптивных моделей туристических комплексов в южных регионах Ирака, обладающих исключительными природными особенностями и ценными ландшафтами, имеет актуальное значение.

Анализ теоретической базы в рамках архитектурного формирования комплексов экотуризма (КЭТ) позволил выделить теоретические разработки по проблемам «зеленой» и «устойчивой архитектуры», «устойчивого проектирования» [8, 9], концептуальным подходам к формированию экологических комплексов [10, 11], организации композиционных связей архитектуры и ландшафта ВБУ [12]. Данные исследования играют решающую роль для разработки подходов к формированию архитектуры комплексов экотуризма. Однако остаются нерешенными вопросы адаптивного проектирования туристических комплексов для водно-болотных ландшафтов: поиск моделей устойчивой архитектуры объектов экотуризма, способных выдерживать сезонные колебания уровня воды и высокую влажность, а также сохранять хрупкое биоразнообразие болотных экосистем.

При разработке общей стратегии развития туризма на ВБУ необходимо отдавать приоритет сохранению ландшафта, учитывая, что часть болот Южного Ирака находится под охраной Рамсарской конвенции и рекомендаций ЮНЕСКО по освоению водно-болотных угодий [5, 6]. Проектирование объектов экотуризма в этих чувствительных экосистемах требует инновационных архитектурных и планировочных подходов, которые минимизируют антропогенное воздействие, одновременно сохраняя притягательность для посетителей [6, 7].

Цель настоящей статьи – сформировать основы комплексного подхода к проектированию объектов экотуризма для условий водно-болотных местностей Ирака. В рамках намеченной цели решаются следующие задачи: 1) выявить специфические области водно-болотного ландшафта с учетом его природного и культурного потенциала; 2) предложить стратегию формирования комплексов экотуризма на ВБУ; 3) в рамках общей стратегии обозначить перспективные подходы к проектированию КЭТ на ВБУ; 4) предложить адаптивные архитектурно-типологические модели объектов экотуризма с учетом особенностей водно-болотного ландшафта.

Материалы и методы

Методы исследования особенностей проектирования в природных экосистемах определяют принципы органической и «зеленой архитектуры» [7–9, 12], которые включают:

- принцип биоинтеграции – определяет методы органичного включения объектов КЭТ в компоненты водно-болотного ландшафта;
- принцип композиционного взаимодействия – предполагает использование методов композиционного согласования объемно-планировочных решений с визуальными характеристиками природного ландшафта;
- принцип ландшафтных автономий – связан с анализом и классификацией сложившихся специфических областей в природном и культурном ландшафте, которые определяют «функциональные активности» и туристические программы;
- принцип прототипирования – определяет методы формообразования различных моделей «зеленой архитектуры» объектов экотуризма, основанные

на интерпретации и прототипировании сложившихся «архетипов» в структуре природного и культурного ландшафта;

– принцип энергоэффективности и зеленых технологий – подразумевает использование в объектах экотуризма альтернативных источников энергии, применение безотходных технологий, энергоэффективных ограждающих конструкций;

– принцип идентичного и глобального – направлен на развитие экотуризма с учетом интересов местных сообществ; использование местных строительных технологий и материалов, что согласуется как с экологической устойчивостью КЭТ, так и с сохранением культурного наследия региона [2, 6]. Данные принципы определяют методы и подходы к органичному взаимодействию объектов инфраструктуры экотуризма с компонентами водно-болотного ландшафта и позволяют минимизировать воздействие на природу.

Результаты

Имеющиеся исследования водно-болотного ландшафта Южного Ирака раскрывают его неоднородность, что создает потенциал для организации различных туристических активностей [1, 2]. Анализ специфики и обобщение региональных особенностей водно-болотной местности позволяют представить ее в виде трех специфических областей – «ландшафтных автономий»:

1) заповедный природный ландшафт болот Чибайиш и Хувайза на границе с Ираном с сохранившейся самобытной флорой и фауной, что позволяет развивать рекреационный, водный туризм, бердвотчинг;

2) антропогенный и частично деградированный ландшафт болот Восточный и Западный Хаммар, Центральных болот, подвергшийся агрессивным воздействиям из-за строительства дорог, плотин, осушения под сельхозугодья, но сохранивший самобытные постройки и поселения «болотных арабов», что создает основу для развития агротуризма, этнографического и приключенческого туризма [3];

3) засушенный культурный водно-болотный ландшафт бывших шумерских городов Месопотамии (Ур, Урук, Эриду) с уникальными археологическими раскопами и остатками зиккуратов из глинобитного кирпича, что делает их важным объектом культурно-познавательного, научного туризма [4]. Выявление ландшафтных автономий требует применения адаптивных методов и моделей формирования архитектуры экотуристических комплексов и выработки общей стратегии развития экотуризма на ВБУ.

С опорой на методическую базу устойчивого проектирования туристических комплексов в исследовании предлагается «дорожная карта» по реализации стратегии формирования объектов экотуризма на ВБУ Южного Ирака (рис. 1). Стратегия направлена не только на сохранение водно-болотных угодий, но и на поддержание экономического роста и культурного наследия региона, позиционируя страну как лидера в области ответственного развития водно-болотного туризма.

Разработанная «дорожная карта» представляет несколько уровней реализации стратегии. Первый уровень определяют руководящие *принципы* устойчивого проектирования на болотах:

1. Минимальное воздействие: сохранение покровного слоя и естественного водного баланса.

2. Энергоэффективность: использование солнечной энергии, естественного освещения и вентиляции.

3. Возобновляемые материалы: глина, тростник, переработанная древесина.

Данные принципы «опираются» на современные исследования в области «зеленой архитектуры» и позволяют учитывать экологические, архитектурные и инженерные аспекты при строительстве в болотистых районах. Это задает на втором уровне реализации стратегии несколько перспективных ключевых подходов к проектированию комплексов экотуризма на ВБУ (рис. 1).



Рис. 1. Дорожная карта по реализации стратегии проектирования объектов экотуризма в водно-болотных угодьях Ирака

Fig. 1. Roadmap for the design implementation of the ecotourism strategy for wetlands in Iraq

Биоклиматическое проектирование. Этот подход ориентирован на использование природных климатических условий для снижения энергопотребления. В болотистых районах Ирака важно учитывать высокую влажность и сезонные изменения уровня воды. Биоклиматическое проектирование включает:

- использование естественной вентиляции для охлаждения помещений;
- выбор устойчивых к влажности и солям строительных материалов;

– размещение зданий с учетом преобладающих ветров и затенения для минимизации перегрева.

Экологически адаптивное проектирование. Проекты должны учитывать местные экосистемы, включая флору, фауну и гидрологические особенности. Его реализация предполагает следующее:

- возведение поднятых конструкций на сваях для защиты от затопления;
- интеграцию зданий в ландшафт без нарушения экосистем;
- использование местных природных материалов (тростник, глина, дерево).

Модульное и мобильное проектирование. Этот тип проектирования особенно важен для экотуристических объектов, которые не должны оказывать долговременного воздействия на окружающую среду. Примеры решений:

- плавающие домики или гостиницы на понтонах, способные адаптироваться к изменению уровня воды;
- разборные и легкие конструкции, которые можно перемещать или убирать без следов вмешательства в природу.

Социально ориентированное проектирование. Проекты должны учитывать потребности местного населения, обеспечивать рабочие места и поддерживать традиционный образ жизни. Его реализация предполагает следующее:

- совместное проектирование с местными сообществами;
- интеграцию традиционных архитектурных решений (например, домов из тростника, как у народа «маадан» (болотные арабы));
- использование местных ремесел и материалов в дизайне (рис. 1).

Третий уровень реализации стратегии формирования туристических комплексов на ВБУ включает *«природосберегающее зонирование»*. При планировании территории экотуристических комплексов важно учитывать три зоны (рис. 1):

- основная природоохранная зона – территория без доступа туристов (места размножения птиц, редкие экосистемы);
- буферная зона – регулируемый доступ (экологические маршруты, исследовательские станции);
- зона туристической активности – размещение объектов туризма (гостиницы, кемпинги, экотропы).

Четвертый уровень стратегии архитектурного формирования туристических комплексов на водно-болотных угодьях включает *использование локальных технологий и знаний*. К ним относятся:

- применение традиционных методов строительства из природных материалов;
- восстановление древних методов водного регулирования (каналы, плавающие острова);
- взаимодействие с местными мастерами для интеграции культурных элементов в архитектуру построек на болотах (рис. 1).

Намеченная стратегия позволяет определить формы и разновидности построек для туристов на водно-болотных угодьях. Типология данных моделей строится по способу архитектурного формообразования объектов.

Рассмотрим частные архитектурно-типологические модели объектов экотуризма для болотистых экосистем (рис. 2).

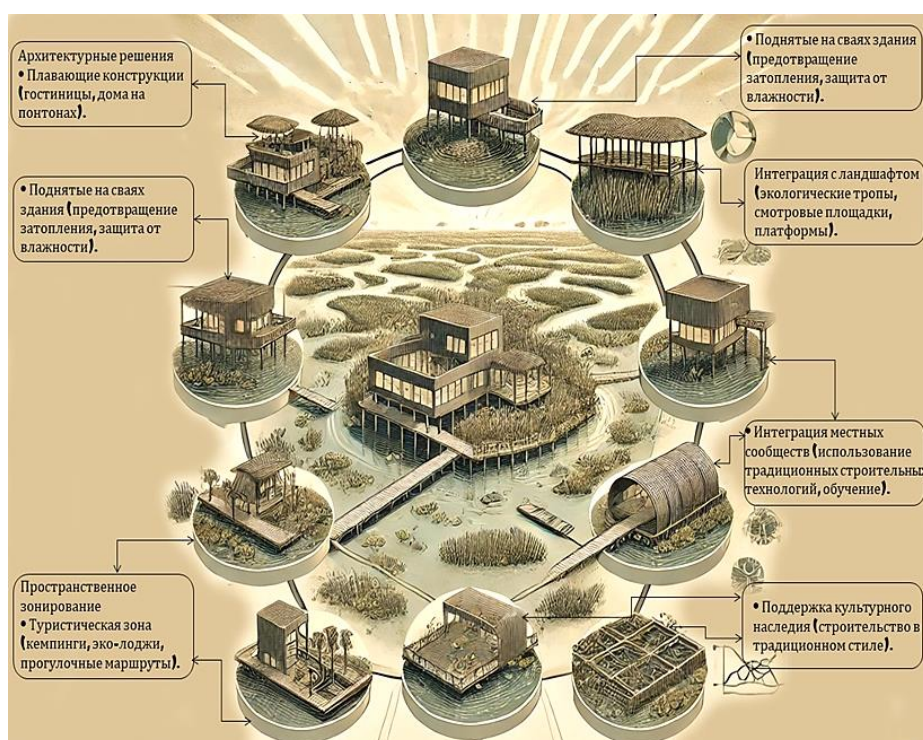


Рис. 2. Предлагаемые частные архитектурно-типологические модели объектов экотуризма на водно-болотных угодьях

Fig. 2. Proposed private architectural and typological models of ecotourism objects on wetlands

1. *Плавающие структуры (искусственные острова, дома-резиденции, гостиницы).* В условиях сезонного изменения уровня воды предлагаются:

- понтонные домики, дома-дебаркадеры (резиденции и гостиницы);
- деревянные платформы на бочках или других плавающих опорах;
- искусственные острова из тростника и глины (рис. 2).

2. *Возвышенные конструкции (дома-бунгало, блокированные домики, экологджи)* – для защиты от затопления:

- бунгало на деревянных сваях (традиционные технологии народов болотистых регионов);
- блокированные дома на бетонных платформах с дренажными системами;
- объекты инфраструктуры на гибких опорах, способные адаптироваться к изменяющейся высоте воды (рис. 2).

3. *Объекты-прототипы: кэмпинги и глэмпинги из местных экологических материалов и по технологии народных жилищ и построек «болотных арабов»:*

- кэмпинги и бунгало по типу народного жилища «мудхиф» из бамбука и тростника – как устойчивых и быстрорастущих материалов;
- дома на суше и островах с применением «глиняных и земляных технологий» – сохраняют прохладу в жарком климате;
- постройки с крышами и стенами из «соломенной изоляции» – для регулирования температуры по технологии «маадан» (жилище болотных арабов).

4. *Встроенные и интегрированные объекты: инженерные сооружения и коммуникации, системы очистки воды и отходов (встроенные, пристроенные, интегрированные в архитектурный объем или в водно-болотный ландшафт):*

- биофилтры и естественные водоочистные системы;
- компостные туалеты для минимизации загрязнения;
- оборудование для рециркуляции воды для хозяйственных нужд.

5. *Временные сборно-разборные объекты и конструкции для туристических маршрутов на ВБУ:*

- смотровые вышки и площадки для бердвотчинга (наблюдения за птицами);
- деревянные пирсы, мосты, галереи и помосты для экотроп (рис. 2).

Для реализации комплексного подхода к развитию экотуризма в водно-болотных угодьях Ирака, который учитывает экологические, архитектурные и социально-экономические аспекты, предлагается модель автономного комплекса экотуризма (КЭТ) на ВБУ. Функциональная схема комплекса включает следующие структурные компоненты: визит-центр для туристов; общественно-досуговый блок; объекты размещения и проживания туристов (отель, блочно-модульные дома, кемпинги у воды); площадки для досуга и отдыха с бассейнами; систему мостов, прогулочных галерей, помостов и экотроп на водно-болотной территории участка (рис. 3).



Рис. 3. Модель автономного комплекса экотуризма на водно-болотных угодьях
Fig. 3. The model of an autonomous wetland ecotourism complex

Объемно-планировочная модель предлагаемого комплекса экотуризма на ВБУ отвечает требованиям биоклиматического и адаптивного проектирования.

1. Экологическая устойчивость:

- минимальное воздействие на природу (сохранение биоразнообразия, ограничение вмешательства в ландшафт);
- использование возобновляемых материалов (тростник, глина, дерево);
- применение энергосберегающих технологий (солнечные панели, естественная вентиляция).

2. Инновационные архитектурные решения:

- плавающие конструкции (гостиницы, дома на понтонах);
- поднятые на сваях здания (предотвращение затопления, защита от влажности);
- интеграция с ландшафтом (экологические тропы, смотровые площадки, платформы).

3. Пространственное зонирование:

- зона строгой охраны (минимальный или запретный доступ);
- буферная зона (научные исследования, экомаршруты);
- туристическая зона (кемпинги, экологические, прогулочные маршруты).

4. Социально-экономическое развитие:

- интеграция местных сообществ (использование традиционных строительных технологий, обучение);
- создание рабочих мест (экскурсоводы, ремесленники, экофермеры);
- поддержка культурного наследия (строительство в традиционном стиле).

5. Управление водными ресурсами:

- эффективная дренажная система (предотвращение заболачивания зданий);
- очистка и повторное использование воды (биофильтры, дождеборники);
- экологичные санитарные системы.

Проектная реализация и строительство предлагаемого автономного комплекса экотуризма на водно-болотных угодьях включает несколько этапов, представленных в таблице.

**График проектной реализации и строительства
автономного туристического комплекса на водно-болотных угодьях
Schedule of project implementation and construction of an autonomous tourist
complex on wetlands**

Этап	Шаги	Сроки
1. Предварительная оценка	1. Выбор участка и экологическая экспертиза 2. Взаимодействие с заинтересованными сторонами (местные сообщества, экологи, политики) 3. Оценка целесообразности (экономические, социальные и экологические факторы)	1–3 мес.
2. Концептуальное проектирование	1. Разработка генерального плана с зонированием (заповедные зоны, туристические зоны) 2. Архитектурное проектирование (плавающие конструкции, приподнятые дорожки, экологические) 3. Выбор устойчивых строительных материалов (тростник, бамбук, глина)	3–6 мес.

Окончание таблицы
End of table

Этап	Шаги	Сроки
3. Экологическое одобрение	1. Проведение оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) 2. Получение разрешений от государственных и регулирующих органов 3. Разработка стратегий сохранения природы (управление водными ресурсами, защита биоразнообразия)	3–6 мес.
4. Развитие инфраструктуры	1. Внедрение экологически чистого транспорта и энергетических решений 2. Строительство плавающих или приподнятых сооружений 3. Установка устойчивых коммунальных систем (солнечная энергия, сбор дождевой воды, компостные туалеты)	6–12 мес.
5. Интеграция сообщества и обучение	1. Вовлечение местных сообществ в строительство и управление 2. Обучение в сфере экотуризма и охраны окружающей среды 3. Развитие культурных туристических программ	3–6 мес.
6. Пилотное тестирование и корректировки	1. Проведение пробного запуска с ограниченным числом посетителей 2. Мониторинг экологических и социальных последствий 3. Корректировка инфраструктуры на основе отзывов	3–6 мес.
7. Полномасштабная эксплуатация и мониторинг	1. Официальное открытие и маркетинг 2. Непрерывный экологический мониторинг и улучшение 3. Долгосрочное планирование устойчивого развития (расширение, адаптация к изменениям климата)	Постоянно

Важным выступает этап «Концептуального проектирования», включающий: а) разработку генерального плана с зонированием; б) архитектурное решение КЭТ; в) конструктивное решение объектов КЭТ (плавающие или свайные конструкции; выбор материалов).

Учет особенностей той или иной автономии водно-болотного ландшафта, а также его устойчивых типологических единиц (остров, полуостров, протока, развилка, буферная тростниковая зона, суша, локальный водоем, сеть каналов и др.) определяет подходы к проектированию и выбору оптимальных моделей объектов экотуризма, включая надземные конструкции, плавучие экодомики и необходимые инженерные, а также естественные системы очистки сточных вод для содействия минимальному нарушению окружающей среды.

Как следует из данных таблицы, важным аспектом развития экотуризма на болотах выступает участие местного сообщества и традиционные знания

в процессе строительства на ВБУ. Это гарантирует, что инфраструктура экотуризма принесет пользу местному населению, одновременно способствуя охране окружающей среды. Сроки, указанные в графике, могут быть откорректированы в ходе реализации проекта.

Заключение

На основе проведенных исследований необходимо сделать следующие выводы:

1. Развитие экотуризма в водно-болотных угодьях (ВБУ) Ирака определяется методологией «зеленой архитектуры» и может быть представлено в виде концептуальной карты (стратегии), которая учитывает экологические, архитектурные и социально-экономические аспекты.

2. В рамках стратегии выделен ряд ключевых подходов к проектированию комплексов экотуризма, которые включают биоклиматическое, экологически адаптивное проектирование, модульное и мобильное, социально ориентированное проектирование.

3. По способу формообразования предложен ряд архитектурно-типологических моделей объектов экотуризма в водно-болотном ландшафте, включающих: а) плавающие структуры; б) возвышенные конструкции; в) объекты-прототипы; г) пристроенные и интегрированные объекты; д) временные сборно-разборные конструкции.

4. Предложена модель автономного комплекса экотуризма на водно-болотных угодьях, который отвечает ключевым принципам адаптивного проектирования, направленным на сохранение хрупкой экосистемы и устойчивое развитие региона, таким как:

– «экологическая устойчивость» – минимизация негативного воздействия на природу за счет использования местных и возобновляемых материалов, применения энергосберегающих технологий и строгого зонирования территории;

– «адаптивное формообразование» в архитектуре объектов – разработка конструкций, приспособленных к болотистым условиям, включая плавающие или приподнятые на сваях здания, а также интеграция природных элементов в туристическую инфраструктуру;

– «пространственное зонирование» – четкое разграничение территорий на заповедные зоны, буферные участки и туристические объекты, что позволяет одновременно развивать туризм и сохранять экосистему;

– «социально-экономическая устойчивость» – вовлечение местных сообществ в процесс планирования и эксплуатации экотуристических объектов, что способствует созданию рабочих мест, сохранению традиционного уклада жизни и повышению уровня жизни населения;

– «рациональное управление водными ресурсами» – внедрение систем сбора и очистки воды, а также экологических санитарных решений для предотвращения загрязнения водно-болотных угодий.

Корректировка модели автономного комплекса экотуризма в ходе проектной реализации происходит с учетом особенностей той или иной «автономии» болотной местности, а также планировочных типологических единиц водно-болотного ландшафта.

5. Сформирован график проектной реализации и строительства автономного туристического комплекса на водно-болотных угодьях, определяющий поэтапное проектирование и внедрение устойчивых решений в водно-болотных районах Ирака.

6. Полученные материалы: стратегические подходы и адаптивные модели объектов экотуризма позволяют не только сохранить уникальные природные территории, но и создают методическую базу для дальнейшего изучения ландшафта и потенциала водно-болотных угодий с точки зрения архитектурного формообразования. Следующим шагом в исследовании может выступать развитие архитектурной типологии объектов экотуризма: по признаку функциональной организации и виду «туристических активностей» в водно-болотной местности; по признаку размещения объектов относительно типовых планировочных единиц водно-болотного ландшафта; по типу зонирования туристических комплексов и т. д. Полученные типологические модели могут способствовать реализации стратегии развития экотуризма в регионе и стать важным шагом на пути к устойчивому будущему.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Abdulhasan N.A., Salim M.A., Al-Obaidi G.S., Ali H.J., Al-Saffar M.A., Abd I.M., Minjil M.Sh.* Classification and Description of Southern Iraqi Marshlands (National Park Area) // *Habitat Mapping and Monitoring Project*. – Sulaimani, Kurdistan, Iraq, 2009. 197 p.
2. *Али Аль-Самаветли Х.Ш., Скопинцев А.В.* Формирование объектов «зеленой архитектуры» в природной среде с развитием экотуризма (на примере водно-болотных местностей Месопотамии) // *Архитектура и дизайн: история, теория, инновации*. 2021. № 5. С. 7–12.
3. *Desk Study on the Environment in Iraq*. United Nations Environment Programme. 2003. 98 p.
4. *National Report on Biodiversity in Iraq*. Republic of Iraq, Ministry of Environment. 2010. July. 153 p.
5. *Destination wetlands: supporting sustainable tourism*. 2012. Secretariat of the Ramsar Convention on Wetlands, Gland, Switzerland & World Tourism Organization (UNWTO), Madrid, Spain.
6. *Водно-болотные угодья и организация их посещений: подходы, примеры и практики развития экологического и устойчивого туризма* // *Bahna* : [сайт]. URL: <https://bahna.land/ru/bolota/vodno-bolotnye-ugodya-i-organizatsiya-ikh-poseshchenij-podkhody-primery-i-praktiki-razvitiya-ekologicheskogo-i-ustojchivogo-turizma> (дата обращения: 10.03.2025).
7. *Янковская Ю.С., Гаджиев Г.А.* Водно-болотные угодья в составе городов. Проблемы сохранения и устойчивого развития // *Вестник науки*. 2020. Т. 3. № 2 (23). С. 141–147.
8. *Зима А.Г.* «Зеленая» архитектура как современное релевантное архитектурное направление // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2019. № 4 (30). С. 74–79.
9. *Есаулов Г.В.* Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 6. С. 9–24.
10. *Слимак И.В.* Концептуальные подходы к формированию архитектуры экопоселений // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 1. С. 44–53. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-44-53
11. *Довбня Я.В., Астахова Е.С.* Особенности архитектурной организации экологических туристических комплексов (на примере юга России) // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. № 26 (5). С. 113–126. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-113-126. EDN: IVLSCX
12. *Аль-Самаветли А., Скопинцев А.В.* Исследование композиционных связей архитектуры и ландшафта при формировании комплексов экотуризма на территории Южного Ирака // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 6. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2021/7031 (дата обращения: 10.03.2025).

REFERENCES

1. *Abdulhasan N.A., Salim M.A., Al-Obaidi G.S., Ali H.J., Al-Saffar M.A., Abd I.M., Minjil M.Sh.* Classification and Description of Southern Iraqi Marshlands (National Park Area). *Habitat Mapping and Monitoring Project*. Sulaimani, Kurdistan, Iraq, 2009. 197 p.

2. Ali Al-Samawetli H.Sh., Skopintsev A.V. Formation of Green Architecture Objects in the Natural Environment with the Development of Eco-Tourism (on the example of wetland areas of Mesopotamia). *Arkhitektura i dizain: istoriya, teoriya, innovatsii*. 2021; (5): 7–12. (In Russian)
3. Desk Study on the Environment in Iraq. United Nations Environment Programme. 2003. 98 p.
4. National Report on Biodiversity in Iraq. Republic of Iraq, Ministry of Environment. July 2010. 153 p.
5. Destination Wetlands: Supporting Sustainable Tourism. 2012. Secretariat of the Ramsar Convention on Wetlands, Gland, Switzerland, & World Tourism Organization (UNWTO), Madrid, Spain.
6. Wetlands and the organization of their visits: approaches, examples and practices for the development of ecological and sustainable tourism. Available: <https://bahna.land/ru/bolota/vodno-bolotnye-ugodya-i-organizatsiya-ikh-poseshchenij-podkhody-primery-i-praktiki-razvitiya-ekologicheskogo-i-ustojchivogo-turizma> (Accessed March 10, 2025). (In Russian)
7. Yankovskaya Yu.S., Gadzhiev G.A. Wetlands as Part of Cities. Problems of Conservation and Sustainable Development. *Vestnik nauki*. 2020; 3 (2 (23)): 141–147. (In Russian)
8. Zima A.G. Green Architecture as a Modern Relevant Architectural Direction. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*. 2019; 4 (30): 74–79. (In Russian)
9. Esaulov G.V. Sustainable Architecture: from Approaches to Strategy of Development. *Vestnik of Tomsk state University of Architecture and Building*. 2014; (6): 9–24 (In Russian)
10. Slimak I.V. Conceptual Approaches to Ecovillage Architecture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (1): 44–53. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-44-53 (In Russian)
11. Dovbnja Ya.V., Astakhova E.S. Architectural Organization of Ecological Tourist Complexes (The South Russia case studies). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (5): 113–126. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-113-126. EDN: IVLSCX (In Russian)
12. Al-Samawetli A., Skopintsev A.V. Compositional Connections of Architecture and Landscape in the Formation of Ecotourism Complexes on the Territory of Southern Iraq. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2021; (6). Available: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2021/7031 (In Russian)

Сведения об авторе

Аль-Самаветли Али Хусейн Шани, аспирант, Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105, ali.alsamawetli@gmail.com

Author Details

Ali Hussein Shani Al-Samawetli, Research Assistant, Southern Federal University, 105, Bolshaya Sadovaya Str., 344006, Rostov-on-Don, Russia, ali.alsamawetli@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16.10.2025
Одобрена после рецензирования 29.10.2025
Принята к публикации 22.01.2026

Submitted for publication 16.10.2025
Approved after review 29.10.2025
Accepted for publication 22.01.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 70–83.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 70–83.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.4:72.03(571.17)

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-70-83

EDN: HCAAGX

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ИНСТИТУТА «ГИПРОГОР» ДЛЯ ГОРОДА ЛЕНИНСКА-КУЗНЕЦКОГО (1945–1947 ГОДЫ): ВЫБОР ПУТИ РАЗВИТИЯ

Ксения Ивановна Колупаева, Ольга Геннадьевна Литвинова

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

Аннотация. Исследование посвящено комплексному анализу градостроительной концепции развития г. Ленинска-Кузнецкого, разработанной институтом «Гипрогор» в 1945–1947 гг. *Актуальность и научная новизна* работы обусловлены введением в научный оборот ранее не публиковавшихся архивных данных, детально раскрывающих уникальный опыт советского градостроительства в сложнейших природно-технических условиях. Впервые столь подробно освещается применение Гипрогором¹ научно обоснованных коэффициентов безопасности для различных типов зданий в зависимости от степени подработки территории, а также многовариантный подход к планировке, балансирующий между экономической целесообразностью добычи угля, технической безопасностью и социальными потребностями.

Целью исследования является реконструкция и оценка процесса послевоенного планирования шахтерского города в центре Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасса), испытывавшего острую необходимость в упорядочении стихийной застройки и создании комфортной среды для растущего населения.

Для достижения цели были выявлены предпосылки и градостроительные проблемы Ленинска-Кузнецкого; проанализирована методология института, основанная на глубоком изучении геологических условий; рассмотрены альтернативные концептуальные варианты развития города; проанализированы итоговое проектное решение и процесс его согласования.

Методологической основой исследования выступил историко-архитектурный анализ, опирающийся на материалы архивного фонда РГА в г. Самаре (Фонд Р-850), что позволило с высокой степенью достоверности восстановить ход проектных работ, этапы экспертизы и утверждения генерального плана.

Выводы. Значимость исследования заключается в том, что оно вносит существенный вклад в историю архитектуры и градостроительства РСФСР, демонстрируя образец комплексного подхода к планировке промышленного города. Полученные выводы имеют не только историческую ценность, но и практическое значение для понимания законо-

¹ Гипрогор – Государственный институт по проектированию городов. Это российский институт градостроительства и инвестиционного развития, который занимается проектированием генеральных планов городов и рабочих поселков, разработкой проектной документации. Он был создан в 1930 г. на базе Бюро планировки городов Картоиздательства НКВД РСФСР и акционерного общества «Проектгражданстрой» [2].

мерностей развития урбанизированных территорий в регионах с добывающей промышленностью и сложной геологической обстановкой.

Ключевые слова: градостроительное планирование, Ленинск-Кузнецкий, институт «Гипрогор», генеральный план, послевоенное восстановление, советское градостроительство

Для цитирования: Колупаева К.И., Литвинова О.Г. Градостроительная концепция института «Гипрогор» для города Ленинска-Кузнецкого (1945–1947 годы): выбор пути развития // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 70–83. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-70-83. EDN: HCAAGX

ORIGINAL ARTICLE

GIPROGOR URBAN PLANNING CONCEPT FOR LENINSK-KUZNETSKY (1945–1947). A DEVELOPMENT PATH

Ksenia I. Kolupaeva, Olga G. Litvinova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The study presents a comprehensive analysis of the urban development concept of Leninsk-Kuznetsky, developed by the Giprogor Institute in 1945–1947.

Purpose: The purpose is to reconstruct and evaluate the post-war planning process of a mining town at the center of the Kuznetsk coal basin (Kuzbass), which feels an urgent need to streamline spontaneous development and create a comfortable environment for the growing population.

Methodology: The methodological basis of the research is the historical and architectural analysis based on the archival documents from the Russian State University in Moscow. It makes it possible to restore the design work, stages of expertise and approval of the master plan.

Research findings: To achieve this goal, the prerequisites and urban planning problems of Leninsk-Kuznetsky are identified; the methodology based on an in-depth study of geological conditions is analyzed; alternative conceptual options for the development of the city are considered; the final design solution and the process of its approval are analyzed.

Practical implication: Research findings have not only a historical value, but also practical significance for understanding the development patterns of urbanized territories in regions with extractive industries and complex geological conditions.

Value: The significance of research lies in the fact that it makes a great contribution to the history of architecture and urban planning of the country, demonstrating an example of an integrated approach to the industrial city planning.

Keywords: urban planning, Leninsk-Kuznetsky, Giprogor Institute, general plan, post-war reconstruction, Soviet urban planning

For citation: Kolupaeva K.I., Litvinova O.G. Giprogor Urban Planning Concept for Leninsk-Kuznetsky (1945–1947). A Development Path. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 70–83. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-70-83. EDN: HCAAGX

Введение

Послевоенное советское градостроительство столкнулось с уникальным вызовом: необходимостью не просто восстановить разрушенные города, но и заложить основы для новых в условиях интенсивной индустриализации, особенно

в восточных регионах страны. Этот процесс, как отмечает М.Г. Меерович, был прямым продолжением градостроительной политики 1920–30-х гг., трансформировавшейся под влиянием новых экономических и социальных задач [1]. Одним из ключевых инструментов этой политики выступил институт «Гипрогор», деятельность которого в первые послевоенные годы стала символом системного подхода к планированию промышленных центров [2]. Генеральный план г. Ленинска-Кузнецкого, разработанный Гипрогором в 1945–1947 гг., представляет собой яркий и до сих пор недостаточно изученный пример этой масштабной работы. Он воплотил в себе сложный поиск баланса между утилитарными потребностями угольной промышленности, диктовавшей темп и ритм жизни всего Кузбасса, и стремлением создать современный, безопасный и комфортный для проживания город.

Исторический контекст формирования города типичен для многих городов Западной Сибири: он вырос из стихийного объединения шахтерских поселков вокруг с. Кольчугино, что предопределило хаотичную планировку и острый дефицит инфраструктуры. Как подчеркивает В.Ф. Болдырев и авторы, изучавшие проекты советского периода, освоение сибирских территорий всегда требовало учета суровых природно-климатических и сложных инженерно-геологических условий [3, 6]. Первые довоенные проекты планировки, разработанные Новосибирским отделением Горстройпроекта, так и не были реализованы, столкнувшись с дефицитом данных и изменением приоритетов. Переломным моментом стало постановление СНК СССР от 10 февраля 1945 г. «Об упорядочении жилищно-коммунального хозяйства и планировки городов Кузбасса», которое инициировало новый этап планового развития региона.

Разработка генерального плана г. Ленинска-Кузнецкого в послевоенный период, как справедливо отмечает Ю.Л. Косенкова, проходила в русле общих тенденций советского градостроительства 1940 – первой половины 50-х гг., для которых был характерен переход от творческих поисков к масштабной практике типового строительства [4]. Однако уникальность данного проекта заключалась в том, что Гипрогору под руководством архитекторов Л.А. Салищева и Л.И. Мартыновой пришлось действовать в исключительно сложной обстановке. Город располагался непосредственно на Ленинском каменноугольном месторождении, а его территория была испещрена геологическими структурами, такими как ильинская свита и Журинский сброс. Это потребовало разработки новаторской для своего времени методики, основанной на глубоком анализе геологических рисков и введении четких коэффициентов безопасности для различных типов застройки.

Многовариантный подход, при котором было рассмотрено семь концепций развития города – от интенсивного освоения угольных «целиков» до создания обособленных поселков, – отражал сложный процесс поиска оптимального решения. Этот подход перекликается с идеями И.М. Смоляра, который анализировал принципы формирования планировочной структуры новых промышленных городов [5]. В конечном итоге выбранный компромиссный вариант, предусматривавший формирование группы жилых районов на безугольных территориях при сохранении связи со старым городом, стал образцом рационального градостроительного проектирования. Он балансировал между эконо-

мической целесообразностью, выраженной в приближении жилья к шахтам, и технической безопасностью, исключавшей капитальное строительство на неподработанных угольных полях.

Таким образом, данное исследование, опирающееся на материалы архивного фонда Российского государственного архива (РГА) в Самаре, ставит целью не просто реконструировать историю создания конкретного генерального плана. Его значимость заключается в раскрытии специфики советского градостроительного подхода в уникальных условиях мощного промышленного региона на примере Ленинска-Кузнецкого. Исследование позволяет проследить, как решалась дилемма между «углем и комфортом» и каким образом закладывались основы той городской среды, которая сохранилась до наших дней.

Материалы и методы исследования

Город Ленинск-Кузнецкий был образован в 1925 г. на основе объединения с. Кольчугино с шахтерскими и железнодорожными поселками. Освоение территории началось в 1864 г., когда на месте современного города была заложена Кольчугинская копь. В 1912 г. было создано акционерное общество «Копикуз», которое получило исключительные права на разработку угольных месторождений в Кузбассе. После национализации в 1920 г. предприятие стало частью государственной угольной промышленности. В 1925 г. с. Кольчугино было преобразовано в город Ленинск-Кузнецкий, что стало важным шагом в развитии угольного бассейна.

Рост добычи угля в Кузбассе в период с 1919 по 1928 г. привел к значительному росту населения города, которое в 1939 г. достигло 82 тыс. чел. В этот период были построены новые шахты, такие как «7 Ноября», «Журинск-3», «Комсомолец», имени Кирова и Полысаевская-1. В 1936 г. Новосибирским отделением Горстройпроекта был разработан проект планировки города, который был утвержден президиумом крайисполкома. В 1937 г. проект был скорректирован и представлен на согласование, но в итоге был отклонен из-за нехватки данных о разведанных угольных запасах.

Первопричиной к началу проектирования г. Ленинска-Кузнецкого со стороны института «Гипрогор» стало постановление Совета народных комиссаров СССР от 10 февраля 1945 г. «Об упорядочении жилищно-коммунального хозяйства и планировки городов Кузбасса». В соответствии с документом в 1945 г. Гипрогор разработал схематические проекты планировки пяти основных городов Кемеровской области, в том числе Ленинска-Кузнецкого.

Процесс проектирования города институтом «Гипрогор» представляет собой яркий пример градостроительной деятельности в послевоенный период в условиях интенсивного развития угольной промышленности. Анализ материалов архивного фонда Российского государственного архива в Самаре (Ф. Р-850. Оп. 5-4. Д. 58) позволяет реконструировать последовательность действий и этапов, через которые прошел институт при разработке генерального плана города.

Начало работы Гипрогора на территории Кемеровской области – это не просто история проектирования города, а создания нового подхода к градостроительству в сложных природно-технических условиях. Специалистам института удалось преодолеть наследие стихийного развития, объединить разроз-

ненные поселки в единую систему и предложить проект, который, несмотря на необходимость многочисленных корректировок, стал основой для дальнейшего развития города. Этот опыт показал, что даже в условиях ограниченных ресурсов и сложной геологической обстановки можно создать рациональный и жизнеспособный градостроительный проект, учитывающий как технические ограничения, так и потребности людей.

Создание оптимальной планировки Ленинска-Кузнецкого представляло собой сложную задачу из-за первоначального стихийного развития, отсутствия общественного транспорта и существовавших ограничений на застройку из-за угольных шахт. Также необходимо было учитывать потребность в расположении новых жилых районов в максимальной близости от промышленных предприятий. Разработкой генерального плана занималось бюро Кузбасса при Гипрогоре, автором проекта выступил архитектор Л.А. Салищев, соавтором генерального плана центральной части города – архитектор Л.И. Мартынова, чьи разработки позже были представлены на рассмотрение областной архитектурной комиссии 26 июля 1947 г.

Методология Гипрогора была основана на глубоком анализе геологических условий. Проект учитывал такие сложные геологические структуры, как ильинская свита² и Журинский сброс³, и определял зоны для строительства с учетом степени подработки территории. Институт установил четкие правила безопасности и коэффициенты безопасности застройки. Было решено, что каменные дома могут строиться только на безугольных участках и над отработанными пластами, в то время как деревянные постройки допускались над выработанными участками при соблюдении требований безопасности.

Одним из важнейших достижений Гипрогора стало создание системы зонирования, учитывающей не только геологические особенности территории, но и потребности населения. Проект предусматривал расселение в виде группы жилых районов, преимущественно на незастроенных территориях без угольных месторождений. Основными районами были определены существующий город и новый северо-западный район, связанные общей транспортной системой. Санитарные разрывы для новых районов были сокращены до 1000 м, а 500-метровая зона от терриконов⁴ подлежала озеленению или переселению (рис. 1).

Однако путь от идей до утверждения оказался долгим и сложным. Документы свидетельствуют о многочисленных этапах согласования: 7 июня 1946 г. проект был рассмотрен и одобрен специальным совещанием при председателе исполкома Ленинска-Кузнецкого горсовета, затем 21 ноября и 21 декабря 1946 г. проекты были направлены на экспертизу в Коллегию Управления по

² Ильинская свита – это геологическая толща, состоящая из песчаников, алевролитов и аргиллитов, часто с прослоями углей. Она залегает выше кузнецкой свиты и представляет собой песчано-глинистые отложения, сформировавшиеся в условиях континентальной осадочности, в том числе в прибрежных зонах.

³ Журинский сброс – это крупный тектонический разлом в земной коре на территории Кузнецкого угольного бассейна, вдоль которого произошло значительное смещение угольных пластов.

⁴ Террикон – это искусственная насыпь или возвышенность, состоящая из пустых пород, отвалов и отходов, образующихся в процессе добычи полезных ископаемых, в первую очередь угля. Термины «террикон» и «терриконы» происходят от французских *terril* (отвал породы) и *conique* (конический), что указывает на их коническую форму.

делам архитектуры при Совете Министров РСФСР. Экспертная комиссия под руководством С.Е. Чернышёва провела детальный анализ представленного проекта, в результате чего возникла необходимость доработать ряд аспектов (Ф. Р-850. Оп. 5-4. Д. 58).

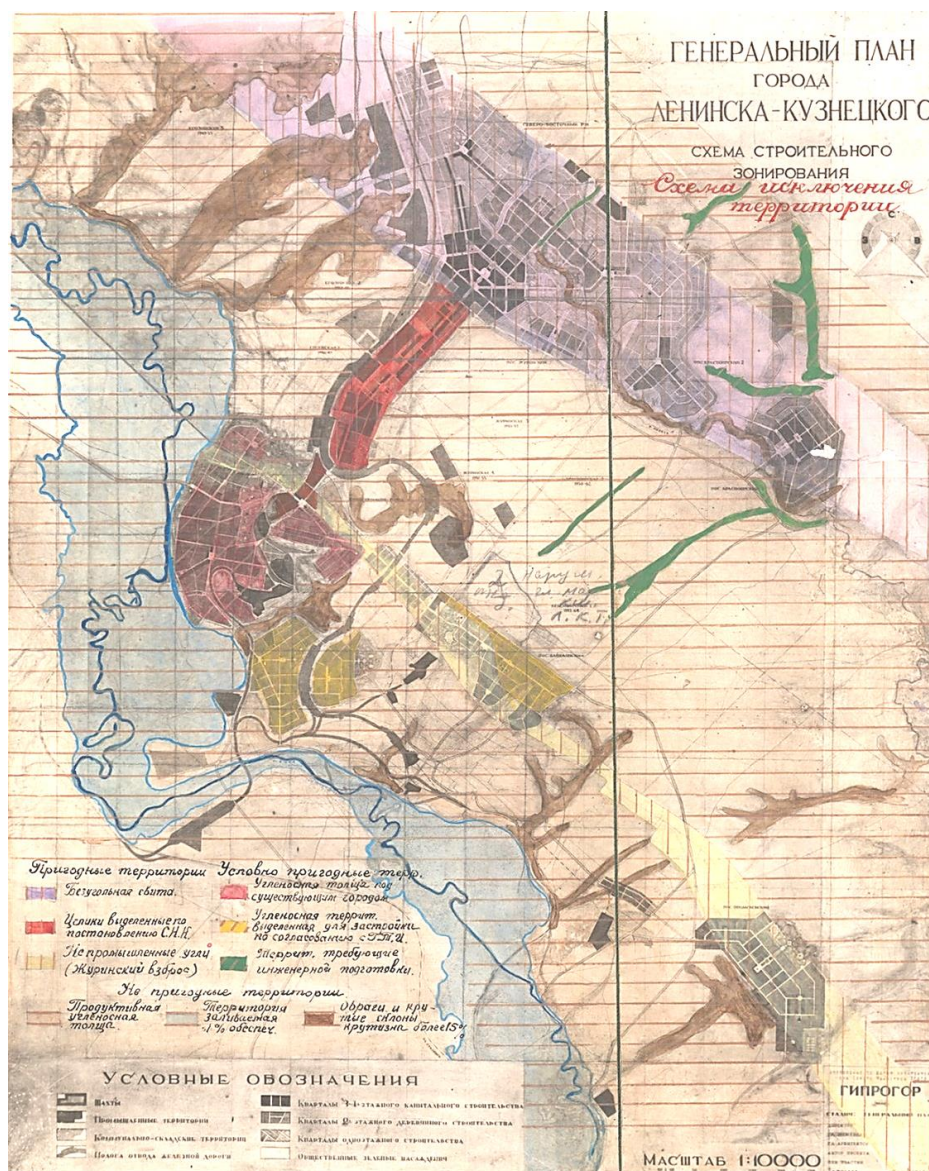


Рис. 1. Схема исключения территории. РГА в Самаре (Ф. Р-850. Оп. 5-4. Д. 58. Л. 42)

Fig. 1. Territorial exclusion scheme. Archival documents from Samara

Показательно, что Гипрогор не ограничился разработкой генерального плана, а предложил целую систему мероприятий для реализации проекта. В частности, институт рекомендовал создать мощную строительную и до-

рожно-строительную организацию, разработать сводный план первой очереди строительства на пятилетний период и создать типовые конструкции зданий для угольных территорий (рис. 2). Эти предложения были отражены в решении исполнительного комитета Ленинска-Кузнецкого городского совета от 10 июня 1947 г., который утвердил генеральный план развития города и обратился в Кемеровский областной исполнительный комитет с ходатайством о выделении финансовых средств и материальных ресурсов.

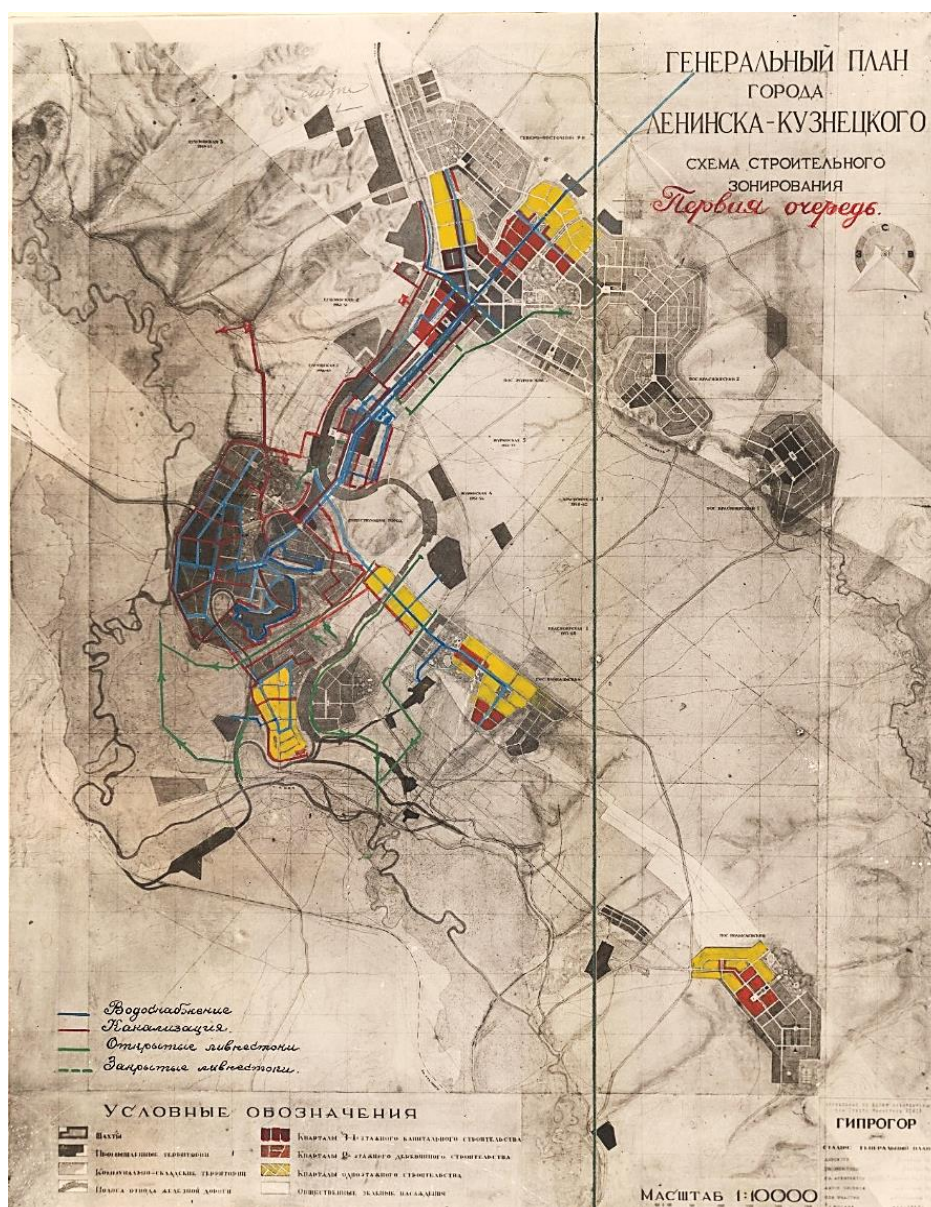


Рис. 2. Первая очередь. РГА в г. Самаре (Ф. Р-850. Оп. 5-4. Д. 58. Л. 231)
Fig. 2. First stage. Archival documents from Samara

Климатические и геологические условия градостроительных концепций

Территория г. Ленинска-Кузнецкого расположена в центре Кузнецкого угольного бассейна, на правом берегу р. Ини. Климат региона характеризуется как умеренно-континентальный, что типично для Западной Сибири. Сезонные колебания температур выражены достаточно сильно, это определяет специфику градостроительных решений и архитектурных проектов.

Зимний период отличается продолжительностью и значительными холодами. Средняя температура января составляет -15°C , при этом минимальные температуры могут опускаться значительно ниже. Лето, напротив, характеризуется теплой, иногда жаркой погодой, а средняя температура июля составляет $+19^{\circ}\text{C}$. Такой температурный режим обуславливает необходимость проектирования зданий с учетом значительных сезонных перепадов температур, что влияет на выбор материалов, толщину стен и систему отопления.

Годовое количество осадков составляет около 500 мм, что является относительно умеренным показателем для данного региона. Осадки выпадают неравномерно в течение года, с преобладанием летних дождей. Весной пойма р. Ини ежегодно затапливается, что создает дополнительные сложности для градостроительного проектирования.

Климатические условия оказывали существенное влияние на выбор мест для застройки, определение ориентации зданий и проектирование инженерных систем города. В частности, ключевыми факторами при разработке генерального плана были необходимость защиты от весенних паводков и учет зимних температурных минимумов.

Территория самого города отличается сложным рельефом, что создавало серьезные трудности для градостроителей. Рельеф местности характеризуется ярко выраженной расчлененностью с многочисленными оврагами и терриконами (отвалами породы после горных работ). Перепады высот достигают существенных значений, что потребовало тщательной вертикальной планировки.

Особое внимание уделялось таким структурам, как ильинская свита и Журинский сброс. Эти геологические образования определяли границы безопасных для застройки зон, а также зон, подлежащих подработке.

Грунты на территории преимущественно рыхлые, с большим содержанием песка и гальки. Такой состав создавал проблемы для фундаментов зданий и требовал специальных мер по укреплению грунтов.

Территория расположена на Ленинском каменноугольном месторождении с запасами угля, оцениваемыми в 9 млрд т на глубине до 300 м. Это определяло необходимость учета подработки территории при проектировании.

В некоторых районах были обнаружены просадочные грунты, что потребовало дополнительных инженерных решений при проектировании зданий и сооружений.

Река Иня, протекающая рядом с территорией города, также оказала существенное влияние на градостроительные решения. Геологические особенности реки и ее долины характеризуются следующим образом. Река протекает в широкой долине с крутыми правыми и пологими левыми берегами. Такая особенность рельефа определила выбор места для застройки: основная часть города расположена на правом берегу.

Пойма реки возвышается на 2–3 м над меженным уровнем и характеризуется значительными уклонами. Пойменная территория представляет собой сложную систему со множеством стариц, рукавов и мелких озер. Весной пойма реки ежегодно затапливается, что создает серьезные проблемы для застройки прибрежных территорий. Этот фактор учитывался при определении границ городской черты и размещении объектов инфраструктуры. Дно реки и ее берега сложены рыхлыми отложениями, в том числе песком и галькой, что влияет на устойчивость склонов и, соответственно, выбор методов берегоукрепления. Водные ресурсы р. Ини соответствуют нормативным требованиям и могут использоваться в производственных целях. Однако для питьевого водоснабжения рекомендовалось использовать подземные воды юрского периода, расположенные в районе хутора Красавина.

В проекте Гипрогора были предусмотрены мероприятия по осушению поймы р. Ини для устранения заболоченности и предотвращения размножения малярийных комаров. Планировалось отрегулировать русло реки, благоустроить береговую линию и создать осушительную систему.

Территория города и прилегающих районов обладает значительными запасами строительных материалов, что имело большое значение для его развития. К основным месторождениям строительных ресурсов относятся:

1. Известняк, добываемый в регионе, использовался для производства вяжущих материалов, что позволяло обеспечивать город необходимым количеством цемента и извести.

2. Песчаник, галька и песок: эти материалы широко использовались в строительстве как для возведения зданий, так и для дорожного строительства. Наличие песчано-галечных отложений упрощало создание инфраструктуры.

3. Сырье для стекольной промышленности: наличие соответствующих минералов позволяло организовать производство стекла на местном уровне, что было важно для обеспечения строительными материалами.

4. Минеральные краски: доступность природных минеральных красителей позволяла создавать разнообразные отделочные материалы для архитектурных объектов.

В 1940-х гг. на территории города уже действовали кирпичный завод и комбинат строительных материалов. Согласно проекту, планировалось расширение производственных мощностей в этой сфере, в том числе:

- кирпичный завод (мощностью 15 млн шт. кирпича);
- завод по производству шлакоблоков (7 млн шт.);
- завод строительных деталей;
- асфальтовый завод.

Эти предприятия должны были удовлетворять растущие потребности города в строительных материалах и снижать зависимость от внешних поставок. В решении исполнительного комитета Ленинска-Кузнецкого городского Совета от 10 июня 1947 г. указывалось на необходимость «организации производства асфальтобетонных смесей на территории города», что подчеркивало важность местного производства строительных материалов для реализации генерального плана (Ф. Р-850. Оп. 5-4. Д. 58).

Наличие местных строительных материалов и производственных мощностей по их обработке стало одним из ключевых факторов, позволивших Ги-

прогору разработать реалистичный и экономически обоснованный генеральный план развития г. Ленинска-Кузнецкого, адаптированный к местным условиям и ресурсам.

Разработка концептуальных вариантов

Согласно историческим документам, институт «Горстройпроект» в процессе подготовки генерального плана города разработал семь различных концепций развития г. Ленинска-Кузнецкого. Такой многовариантный подход был продиктован сложностью задачи: город стихийно разрастался без планового регулирования, а его территория активно застраивалась угольными шахтами. Как отмечалось в заключении экспертной комиссии, Новосибирское отделение Горстройпроекта выполнило значительный объем работ по планировке городов Кузнецкого угольного бассейна, подготовив материалы, которые представляют ценность для обсуждения вопросов градостроительства и районной планировки (Ф. Р-850. Оп. 5-4. Д. 58).

Все семь вариантов имели общую основу – сохранение существующего города с его дальнейшим развитием в северо-восточном направлении вдоль Томской железной дороги. Это было обусловлено необходимостью сохранения транспортной логистики и инфраструктурных связей. Однако основное различие между вариантами заключалось в степени освоения богатых углем территорий, что определяло весь последующий ход проектирования.

Первый вариант предполагал интенсивную разработку целиков (оставшихся неразработанными участков между шахтами) и их продолжение на безугольных территориях. Такой подход был наиболее экономически выгодным, поскольку позволял максимально использовать имеющиеся земельные ресурсы, но создавал серьезные риски для безопасности жилых зданий в будущем.

Второй вариант, напротив, ограничивал освоение целиков, предлагая перенести новое строительство на «безугольные земли». Это решение снижало техногенные риски, но требовало больших затрат на инфраструктуру и увеличивало расстояние между жилыми районами и местами работы.

Третий, четвертый, пятый и шестой варианты шли дальше – они предусматривали новое строительство только на безугольных территориях, расположенных вдали от целика и старого города. Эти концепции были наиболее безопасными с точки зрения геологических рисков, но создавали проблемы с транспортной доступностью и требовали значительных инвестиций в развитие новой инфраструктуры.

Седьмой вариант представлял собой концепцию облегченного строительства, предполагавшую развитие города отдельными поселками при шахтах. Эта идея была близка к традиционной для угольной промышленности модели расселения, но не отвечала задачам создания единого, целостного городского пространства.

Проектное расселение предусматривало формирование группы жилых районов преимущественно на незастроенных территориях, где нет угольных месторождений, с сохранением санитарных разрывов. Основными районами были определены: Центральный (современный город), Байкаимский микрорайон, Полысаевский микрорайон, Северо-Восточный район.

Особое значение имела концепция Северо-Восточного района, который планировался для работников крупных предприятий и шахт. Этот район частично располагался на целике, частично – на безугольной свите, что отражало компромиссный характер выбранного варианта.

Важным элементом концептуальных решений стала линейная система застройки с магистралями, проходящими через северо-западную и северо-восточную части города, а также вдоль Журинского разлома. Главной осью города был определен проспект Кирова, который планировалось продлить от вокзала до новой центральной площади на три километра. На этом проспекте предполагалось создать архитектурные ансамбли, включающие скверы, площади и общественные здания, что должно было придать городу целостный и упорядоченный облик.

Концепция института «Гипрогор»

Все инстанции, рассматривавшие проекты расселения Новосибирского отделения Горстройпроекта в 1939 г., отвергли варианты, предусматривающие перенос нового строительства на 10–20 км от существующего города и шахт. Президиум Ленинского горсовета и Междуправительственная комиссия признали такие предложения нереальными, ухудшающими жилищно-коммунальное хозяйство и снижающими темпы угледобычи.

Одобен был комбинированный вариант, включавший застройку капитальными домами на территориях целика и малоэтажными домами на угольных территориях к востоку от него. Это обеспечивало компактное развитие города в продолжение существующего. Планировалось создание двух изолированных поселков Егоровского и Байкаимского для отдельных шахт.

Комбинированный вариант был утвержден Совнаркомом РСФСР постановлением № 763 от 10 октября 1940 г. Война 1941–1945 гг. прервала разработку генерального проекта планировки г. Ленинска-Кузнецкого. В период войны застройка города осуществлялась с учетом утвержденного постановления, но при этом самовольная застройка «нахаловок» продолжалась.

Впоследствии возникла необходимость разработки нового генерального проекта. Численность населения к этому времени достигла 93 000 чел. Исходные данные для проектирования 1939 г., включая проектную мощность шахт и численность кадров, требовали пересмотра.

По новым данным Кузбассуглеразведки мощность шахт должна была составить 12,75 млн т, а производительность труда шахтеров – 435 т в год. Численность градообразующих кадров увеличилась до 64 225 чел., а общая проектная численность населения – до 200 000 чел. Расчет на многоэтажное строительство был пересмотрен в пользу усадебной застройки.

Генеральный проект предусматривал освоение новых территорий к северо-западу от существующего города. Застройка угольных территорий включалась. Планировались новые поселки для шахт, удаленных от города (Ф. Р-850. Оп. 5-4. Д. 58).

К разработке генерального плана приступил институт «Гипрогор», который столкнулся с необходимостью найти баланс между несколькими противоречивыми факторами: экономической целесообразностью, технической без-

опасностью, санитарными нормами и социальными потребностями населения. Особое внимание уделялось вопросам зонирования застройки в зависимости от степени подработки территории.

Институт впервые для данной территории установил четкие коэффициенты безопасности для различных типов строений:

- для каменных строений второй категории охраны – 1,50;
- для деревянных двухэтажных строений – 0,80;
- для деревянных одноэтажных строений – 0,35.

Эти коэффициенты рассчитывались для предотвращения значительных повреждений зданий и предусматривали необходимость текущего ремонта в случае незначительных деформаций. На основе этих расчетов определялось расположение различных типов застройки: каменные дома можно было строить только на безугольных участках и над отработанными пластами, а деревянные постройки допускалось возводить над выработанными участками при соблюдении требований безопасности.

При разработке концептуальных вариантов Гипрогор также уделил внимание вопросам озеленения и экологической безопасности. Было решено создать два крупных парка культуры и отдыха: в центре существующего города (48 га) и в новом северо-западном районе (47,7 га). Кроме того, планировалось создать районные парки, городские сады, скверы и бульвары для интеграции зеленых зон в городскую структуру.

Основные принципы проекта, разработанного Гипрогором:

1. Недопущение застройки угольных полей (кроме целика).
2. Приближение жилья к местам работы.
3. Сохранение связи старого города с новыми районами.

Проект был разработан институтом «Гипрогор» и утвержден Госпланом СССР в 1947 г. Он предусматривал угледобычу в 14 млн т и учитывал требования безопасности и зонирования.

Генплан не охватывал все возможные населенные пункты в районе. Планировались новые поселения за пределами территории генплана, связанные с шахтами и химической промышленностью.

Процесс выбора окончательного концептуального решения был долгим и сложным. Как свидетельствуют документы, 7 июня 1946 г. схематический проект планировки г. Ленинска-Кузнецкого был рассмотрен и одобрен специальным совещанием при председателе исполкома Ленинска-Кузнецкого городского совета. Затем, 21 ноября и 21 декабря 1946 г., проекты были направлены на экспертизу в Коллегию Управления по делам архитектуры при Совете Министров РСФСР. Экспертная комиссия под руководством С.Е. Чернышёва провела детальный анализ представленных вариантов и рекомендовала доработать ряд аспектов.

Окончательное решение о выборе концепции было принято 10 июня 1947 г. исполнительным комитетом Ленинска-Кузнецкого городского Совета, который утвердил генеральный план развития города. Как отмечалось в решении, был принят вариант, предусматривающий заселение в виде группы жилых районов, преимущественно на незастроенных территориях без угольных месторождений, с сохранением санитарных разрывов. Основными районами были определены существующий город и новый северо-западный район, связанные общей транспортной системой.

Заключение

Разработка концептуальных вариантов для г. Ленинска-Кузнецкого институтом «Гипрогор» стала важным этапом в истории советского градостроительства. Она продемонстрировала, что даже в условиях сложной геологической обстановки и ограниченных ресурсов можно создать рациональный и жизнеспособный градостроительный проект, учитывающий как технические ограничения, так и потребности жителей. Многовариантный подход, примененный Гипрогором, позволил выбрать оптимальное решение, балансирующее между экономической целесообразностью, технической безопасностью и социальными потребностями, что сделало проект Ленинска-Кузнецкого примером взвешенного градостроительного проектирования в условиях промышленного освоения Сибири.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Меерович М.Г.* Градостроительная политика в СССР (1917–1929). От города-сада к ведомственному рабочему поселку. Москва : Редакция журнала «Новое литературное обозрение», 2017. 352 с. ISBN 978-5-4448-0624-1. EDN: YRAMRJ
2. *Меерович М.Г.* Гипрогор. Первые годы деятельности. К 85-летию Государственного треста по планировке населенных мест и гражданскому проектированию «Гипрогор» // Архитектурное наследие. Санкт-Петербург. 2014. Вып. 61. С. 294–312.
3. *Болдырев В.Ф.* Основы градостроительства в условиях Западной Сибири. Томск : Изд-во ТГУ, 1991. 160 с.
4. *Косенкова Ю.Л.* Советский город 1940-х – первой половины 1950-х годов (От творческих поисков к практике строительства) : специальность 18.00.01 : диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры / Косенкова Юлия Леонидовна. Москва, 2000. 379 с. EDN: QDGQGR
5. *Смоляр И.М.* Новые города (Планировочная структура городов промышленного и научно-производственного профиля). Москва : Стройиздат, 1972. 178 с.
6. *Колупаева К.И., Литвинова О.Г.* Советский опыт планировки городов: на примере генерального плана застройки центра Томска в 1973 г // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 3. С. 33–49. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-3-33-49. EDN: FGFFUN

REFERENCES

1. *Meerovich, M.G.* Urban Planning Policy in the USSR (1917-1929). From Garden City to Departmental Settlement Moscow, 2017. 352 p. ISBN 978-5-4448-0624-1. EDN: YRAMJ (In Russian)
2. *Meerovich M.G.* Giprogor. The First Years of Operations. On the 85th Anniversary of the State Trust for Population Planning and Civil Engineering "Giprogor". *Arkhitelturnoe nasledstvo*. 2014; (61): 294–312. (In Russian)
3. *Boldyrev In.F.* Fundamentals of Urban Planning in West Siberia. Tomsk: TSU, 1991. 160 p. (In Russian)
4. *Kosenkova Yu.L.* The Soviet City in the 1940s and Early 1950th: From Creative Pursuits to Construction Practices. DSc Thesis. Moscow, 2000. 379 p. EDN: QDGQGR (In Russian)
5. *Smolyar A.M.* New Cities (planning structure of industrial and scientific-industrial cities). Moscow: Stroiizdat, 1972. 178 p. (In Russian)
6. *Kolupaeva K.I., Litvinova O.G.* Soviet Experience in Urban Planning: The General Development plan of Tomsk Center in 1973. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitelturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (3): 33–49. (In Russian)

Сведения об авторах

Колупаева Ксения Ивановна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ksushakolupaeva@gmail.com

Литвинова Ольга Геннадьевна, канд. ист. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, litvinovaolga1982@gmail.com

Authors Details

Ksenia I. Kolupaeva, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ksushakolupaeva@gmail.com

Olga G. Litvinova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, litvinovaolga1982@gmail.com

Вклад авторов

Колупаева К.И. – поиск и систематизация источников, анализ данных, подготовка текста, итоговые выводы.

Литвинова О.Г. – научное руководство, концепция исследования, методология, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Kolupaeva K.I. – literature review, data analysis, writing–original draft preparation.

Litvinova O.G. –conceptualization, supervision; methodology.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025
Одобрена после рецензирования 29.10.2025
Принята к публикации 22.01.2026

Submitted for publication 08.10.2025
Approved after review 29.10.2025
Accepted for publication 22.01.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 84–100.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 84–100
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.168-1/9

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-84-100

EDN: HGOSBV

ОСОБЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ПРИРЕЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В РАЙОНЕ РЕЧНОГО ВОКЗАЛА В ГОРОДЕ КАЗАНИ

Андрей Георгиевич Вайтенс, Алена Андреевна Матвеева

Санкт-Петербургский государственный

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

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения проблем, связанных с наличием неиспользованных промышленных и приречных территорий в районе речного вокзала г. Казани в водоохранной зоне Куйбышевского водохранилища левого берега Волги.

Цель исследования заключается в проведении комплексного анализа современного состояния рассматриваемых территорий для выявления проблем этих территорий, оценки их влияния на градостроительную ситуацию города. Проанализирован и оценен их градостроительный потенциал на основе водно-экологических, социально-экономических и инфраструктурных условий, функционально-территориальных потребностей города, отраженных в стратегических документах, и возможности переноса промышленных объектов в рамках агломерационной политики региона.

Методология работы включает картографический анализ и анализ стратегических и нормативных документов, научной литературы.

Результаты. Выявлены ключевые проблемы и возможности для преобразования и развития промышленных и приречных территорий, что позволяет сформировать научно обоснованные рекомендации по их устойчивой интеграции в городскую среду. Полученные данные дополняют научные работы в области градостроительного развития прибрежных зон.

Ключевые слова: промышленные территории, речной вокзал, речной порт, градостроительный потенциал, преобразования территорий

Для цитирования: Вайтенс А.Г., Матвеева А.А. Особенности промышленных и приречных территорий в районе речного вокзала в городе Казани // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 84–100. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-84-100. EDN: HGOSBV

ORIGINAL ARTICLE

FEATURES OF INDUSTRIAL TERRITORIES
AND RIVERSIDE STATION IN KAZAN

Andrey G. Vaitens, Alena A. Matveeva

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. This study to addresses problems associated with the presence of unused industrial and riverside station territories in the Kazan River, locating in the water protection zone of the Kuibyshev Reservoir on the left bank of the Volga.

Purpose: The purpose of this study is to conduct a comprehensive analysis of the territories to identify their problems and assess their impact on the urban planning. The urban planning potential is analyzed and assessed based on water-ecological, socio-economic, and infrastructural conditions, functional-territorial needs as reflected in strategic documents, and the possibility of relocating industrial facilities in the framework of the regional agglomeration policy.

Methodology: The cartographic analysis, analysis of strategic and regulatory documents and literature review.

Research findings: This work identifies the key problems and opportunities of transforming and developing industrial and riverside areas. This identification allows for the formulation of scientifically sound recommendations for the sustainable integration of these areas into the urban environment. The obtained data contribute to research into urban development of riverside zones.

Keywords: industrial area, riverside station, river port, urban-planning potential, territory renovation

For citation: Vaitens A.G., Matveeva A.A. Features of Industrial Territories and Riverside Station in Kazan. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 84–100. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-84-100. EDN: HGOSBV

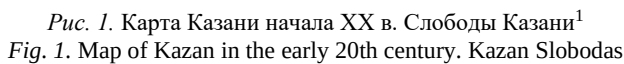
Введение

Рассматриваемые исторически сложившиеся промышленные и приречные территории расположены на левом берегу р. Волги в зоне Куйбышевского водохранилища в непосредственной близости к центральной части Казани. Наличие частично используемых промышленных территорий, граничащих с центром города и находящихся в прибрежной зоне, – проблема, которая связана с экологическими, транспортными и социальными факторами. Предприятия, ранее располагавшиеся на окраинах города, в процессе развития переместились в центр. Это привело к негативному воздействию на окружающую среду, ограничению используемой инфраструктуры и депрессивному влиянию на прилегающую среду.

В период, когда Адмиралтейская и Ново-Татарская слободы (рис. 1) являлись периферийными районами города, пристани на берегах Волги и Казанки играли ключевую роль в обеспечении грузопотока, будучи важными логистическими узлами, обеспечивающими связь между городами по Волжскому пути, что привело к концентрации промышленных объектов, в особенности в районе речного порта.

Параллельно с формированием промышленных зон развивалась и прилегающая жилая застройка для рабочих вдоль береговой линии. С 1991 г. наблю-

Вестник ТГАСУ. 2026. Т. 28. №1



Промышленные депрессивные территории в рассматриваемом случае определяются как земельные участки, используемые или ранее использовавшиеся для промышленной деятельности, включая заводы, фабрики, склады, производственные цеха и другие объекты, связанные с промышленным производством и обслуживанием. Данные территории характеризуются высокой степенью загрязнения, устаревшей инфраструктурой, недоступностью территорий и неэффективностью пользования.

¹ Карта Казани начала XX века. Слободы Казани (в авторской интерпретации). URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1336966>

Приречные депрессивные территории в данном случае определяются как земельные участки, прилегающие к водным объектам, к р. Волге и Куйбышевскому водохранилищу, заняты различной застройкой, индивидуальными жилыми домами, поселками, дачным строительством, ключевой характеристикой которых является близость к воде и расположение в береговой зоне. Данные территории обладают рекреационным потенциалом: транспортной доступностью, экологическим разнообразием, что требует особого подхода к планированию, учитывающего риски затопления и загрязнения.

Под градостроительным потенциалом рассматриваемых депрессивных территорий понимается совокупность водно-экологических, социально-экономических, инфраструктурных условий и правовых возможностей для развития и влияния их на смежные территории города.

Исследование базируется на комплексном градостроительном анализе, выполненном с использованием картографического метода и обзора научной литературы и стратегических документов.

1. Генплан Казани до 2040 г. (периоды: первая очередь строительства – до 2025 г., расчетный срок – до 2040 г., перспектива – до 2055 г.)².

2. Стратегия социально-экономического развития муниципального образования г. Казани до 2030 г. с перспективой до 2040 г.³

3. Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 г. с продлением до 2040 г.⁴

4. Национальный проект Республики Татарстан «Экологическое благополучие» до 2030 г.⁵

1. Обоснование границ рассматриваемых территорий в районе речного вокзала в г. Казани

Северной границей рассматриваемых территорий предлагается ул. Девятаева (автомагистраль), западной границей – Куйбышевское водохранилище и р. Волга, южной границей – ул. Владимира Кулагина (автомагистраль), включая п. Кукушкино по ул. Магистральной, восточной границей – южная ветка железнодорожной инфраструктуры (рис. 2).

Выбор данных границ обусловлен несколькими факторами.

1. Существующая транспортная инфраструктура. Улицы магистрального значения (ул. Девятаева, Владимира Кулагина, Магистральная) и железнодорожные пути формируют четкие физические границы, а также являются важ-

² Решение Казанской городской думы от 28 февраля 2020 г. № 5-38 «Об утверждении Генерального плана городского округа Казань» (с изменениями на 22 ноября 2022 г.)

³ Закон Республики Татарстан № 40-ЗРТ «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 г.» с изм. и доп. от 25 декабря 2019 года: с продлением до 2040 г.

⁴ Закон РТ от 05.04.2019 № 31-ЗРТ «О внесении изменений в Закон Республики Татарстан от 17 июня 2015 года № 40-ЗРТ «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 года»».

⁵ Национальный проект Республики Татарстан «Экологическое благополучие» до 2030 года по указу президента РФ «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» от 7 мая 2024 г.

ными транспортными линиями, определяющими доступность и связность рассматриваемых территорий с другими районами города.

2. Существующее функциональное зонирование. Большая часть рассматриваемых территорий граничит с центром Казани и отделена от него железной дорогой со станциями Вахитово и Тихорецкая. Это позволяет комплексно оценить влияние транспортных узлов и исторической застройки на развитие и функционирование прилегающих территорий. Часть рассматриваемых территорий, исторические градоформирующие объекты – речной порт, Ново-Татарская слобода и Ново-Татарское кладбище, расположены между Волгой на западе, путями южного внутригородского железнодорожного хода на востоке.

3. Существующие естественные границы. Волга (Куйбышевское водохранилище) является значимым природным элементом и формирует четкую западную границу, подчеркивает важность учета экологических факторов при планировании развития территории, влияния деградирующих промышленных и приречных территорий на экологию.



Рис. 2. Генплан Казани до 2040 г.⁶

Fig. 2. Master plan of Kazan until 2040

⁶ Генплан Казани до 2040 г. (в авторской интерпретации). URL: <https://kzn.ru/meriya/ispolnitelnyy-komitet/upravlenie-arkhitektury-i-gradostroitelstva-ispolnitelnogo-komiteta-g-kazani/gradostroitelstvo/>

Предлагаемые границы позволяют всесторонне оценить текущее состояние, выявить градостроительный потенциал и определить направления возможностей развития промышленных и приречных территорий с учетом их транспортной доступности, функциональной специфики, природных особенностей и исторических аспектов.

2. Проблемы современного состояния рассматриваемых территорий

С целью выявления проблем современного состояния рассматриваемых территорий проведен комплексный градостроительный анализ, основанный на картографическом методе, а также анализ существующих статей и исследований, посвященных данной теме. Проведен комплексный анализ существующих исследуемых территорий, их функциональные зоны по Генплану Казани до 2040 г. (рис. 2) и Стратегии социально-экономического развития с перспективой до 2040 г.

Территории можно разделить на 4 зоны по общим признакам (рис. 3), границами которых будет являться транспортная сеть – естественный разделитель, ограничивая территории, требующие особого внимания в рамках градостроительного анализа:

- зона 1 – зона исторического образования речного порта, речной вокзал;
- зона 2 – зона Ново-Татарской слободы, прилегающей к центру города, включая Ново-Татарское кладбище;
- зона 3 – исторически сложившийся п. Кукушкино, бывшие промышленные территории прибрежной зоны;
- зона 4 – п. Юл Урам, жилой массив «Поповка» среди складских и промышленных территорий.

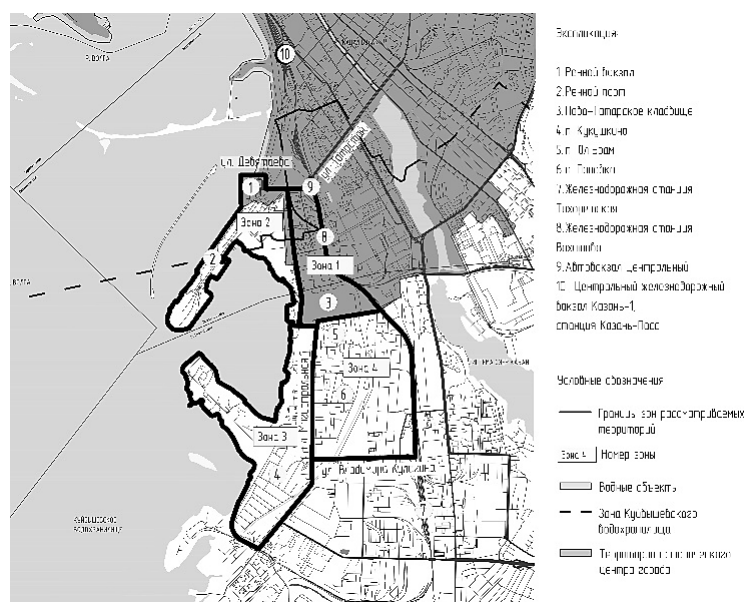


Рис. 3. Границы зон рассматриваемых территорий
Fig. 3. Boundaries of the studied zones

Функциональное зонирование I-й зоны (рис. 4) представлено в основном деградирующими промышленными территориями речного порта. Здесь расположены зоны производственно-коммунальных объектов, включающие «Татфлот», «Казанскую Сольбазу», «Восток», «Меховщик» и мебельную фабрику «Саф». Присутствуют приречные зоны непрямоуличного назначения: объекты спорта (стадион «Водник»), многоквартирные дома (жилая застройка XX в.), общественно-деловые зоны (деловые центры), объекты образования (ВГУВТ и филиалы) и торговли (рынок), а также стройплощадки.

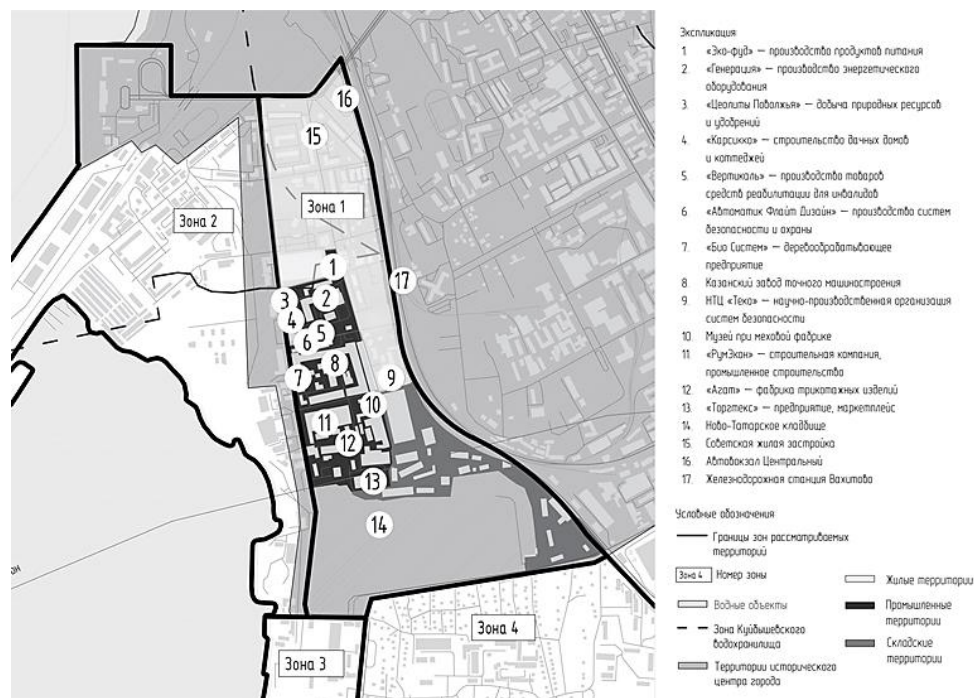


Рис. 4. Зона 1 рассматриваемых территорий

Fig. 4. Zone 1

Сохраняемые объекты данной зоны – речной порт, элеватор – «Татарстанские зерновые технологии». Основная деятельность речного порта связана с обслуживанием действующих предприятий, в частности элеватора. Здание речного вокзала полузаброшено. Генпланом Казани до 2040 г. эти зоны установлены как многофункциональные зоны развития, освоения территории при условии разработки проекта планировки.

В контексте активного развития Свияжского мультимодального логистического центра (СММЛЦ) и планомерной реновации территорий текущая грузоперевалочная деятельность Казанского речного порта переносится в СММЛЦ. Планируется строительство отгрузочных терминалов «Саконы» и «Свияжск» на базе СММЛЦ и на берегу Камы в Алексеевском районе, обеспечивающих прием зерновых, масличных и технических культур с автотранспорта, их хранение и перевалку на водный и железнодорожный транспорт.

Зона 2 (рис. 5) – историческая Ново-Татарская слобода. Здесь преобладают жилая застройка XX в. и многочисленные производственно-коммунальные объекты (в том числе легкой промышленности), а также строительная, деревообрабатывающая, химическая и машиностроительная компании.

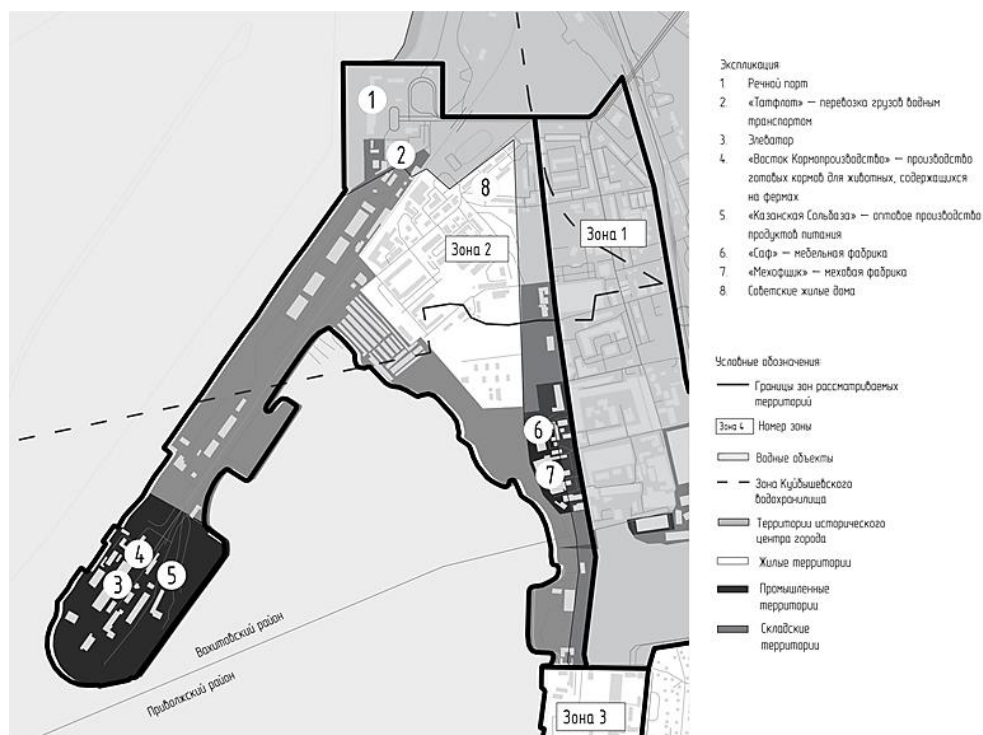


Рис. 5. Зона 2 рассматриваемых территорий
Fig. 5. Zone 2

В зоне расположены складские и торговые объекты (включая «Маза-Парк»), градоформирующий объект – Ново-Татарское кладбище (с 1728 г. недействующее, но открытое как общественное пространство), образовательные учреждения (Казанский инновационный университет) и ценные историко-культурные объекты (мечети «Иске Таш», «Белая мечеть», Казанское мусульманское медресе «Мухаммадия»).

Согласно Генплану Казани до 2040 г., эти территории обозначены зонами смешанного размещения производственных, коммунально-складских объектов и общественно-деловой застройки. Центральный автовокзал планируется перенести на окраину города для разгрузки транспортной сети; через его территорию пройдет новая магистраль. Историко-культурные и образовательные зоны также будут преобразованы в многоквартирную жилую застройку с высокой долей общественных функций.

Зона 3 (рис. 6) представлена производственно-коммунальными объектами (склады, производство бетонных и металлоизделий, грузоперевозки, теплоизолированные трубы, телекоммуникационное оборудование, СИЗ), про-

мышленной инфраструктурой. Приречные зоны здесь представлены объектами образования (юридический институт МВД, школа) и жилой зоной (п. Кукушкино). Согласно Генплану Казани до 2040 г., территория станет многофункциональной зоной развития (при последующей разработке ППТ).

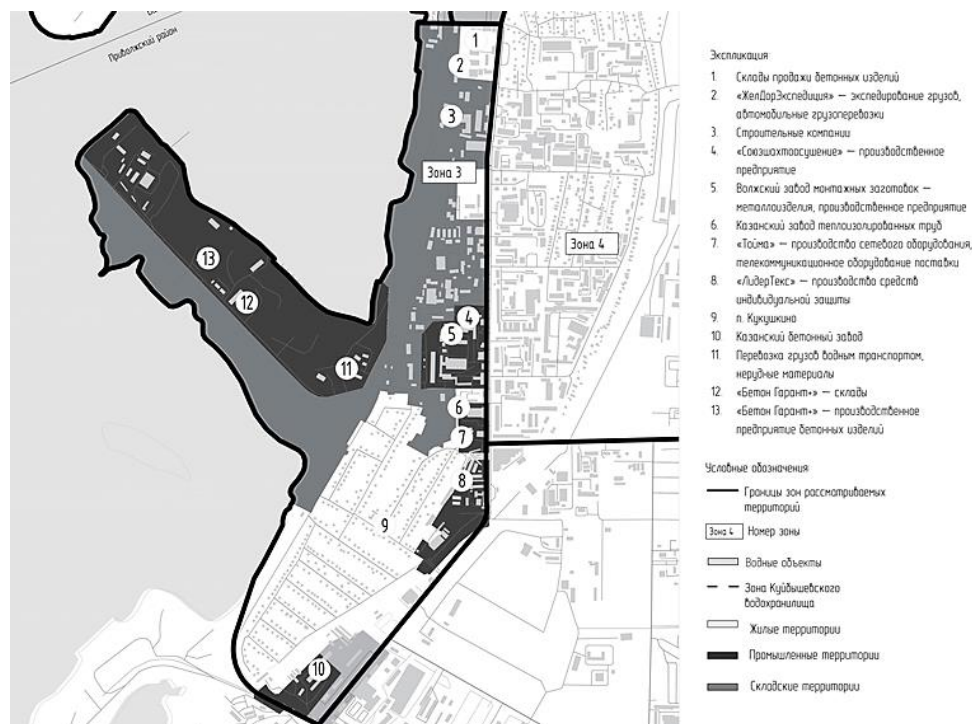


Рис. 6. Зона 3 рассматриваемых территорий
Fig. 6. Zone 3

Согласно Стратегии социально-экономического развития г. Казани до 2030 г. с продлением до 2040 г., п. Кукушкино планируется к переносу к жилым массивам «Победилово», «Отары», которые находятся в 5 км к югу от рассматриваемых территорий у протока Подувалье, согласно федеральному проекту Республики Татарстан «Экологическое благополучие» до 2030 г.

В направлении «Сокращение доли загрязненных сточных вод, отводимых в р. Волгу» рассматривается возможность выноса производственных предприятий с береговой зоны исследуемых территорий, а в направлении «Ликвидация объектов накопленного экологического вреда, представляющих угрозу реке Волге» рассматривается возможность переноса поселков с береговой зоны исследуемых территорий.

Согласно Водному кодексу Российской Федерации⁷, вдоль береговой линии шириной 20 м, как правило, находится зона общего пользования. По факту

⁷ Водный кодекс Российской Федерации («Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 № 74-ФЗ, ред. от 29.07.2017 г.).

данный доступ на территорию отсутствует, а береговая полоса не благоустроена. Почти все рассматриваемые территории входят в водоохранную зону, в которой жилые массивы большей частью состоят из домов индивидуальной застройки с гаражами, с небольшими земельными участками при них, разветвленной уличной сетью и проблемными коммуникациями.

В 4-й зоне (рис. 7) расположены объекты образования (Межрегиональный учебный центр УФСИН, Казанский юридический институт МВД) и производственно-коммунальные объекты: строительные компании, производство лестниц, дверей, кровельных материалов, энергетического и электротехнического оборудования, тротуарной плитки, стройматериалов, тары и упаковки, алкогольной продукции, бумажной продукции, мебели, металлоконструкций, декоративных покрытий, обработка камня и др.

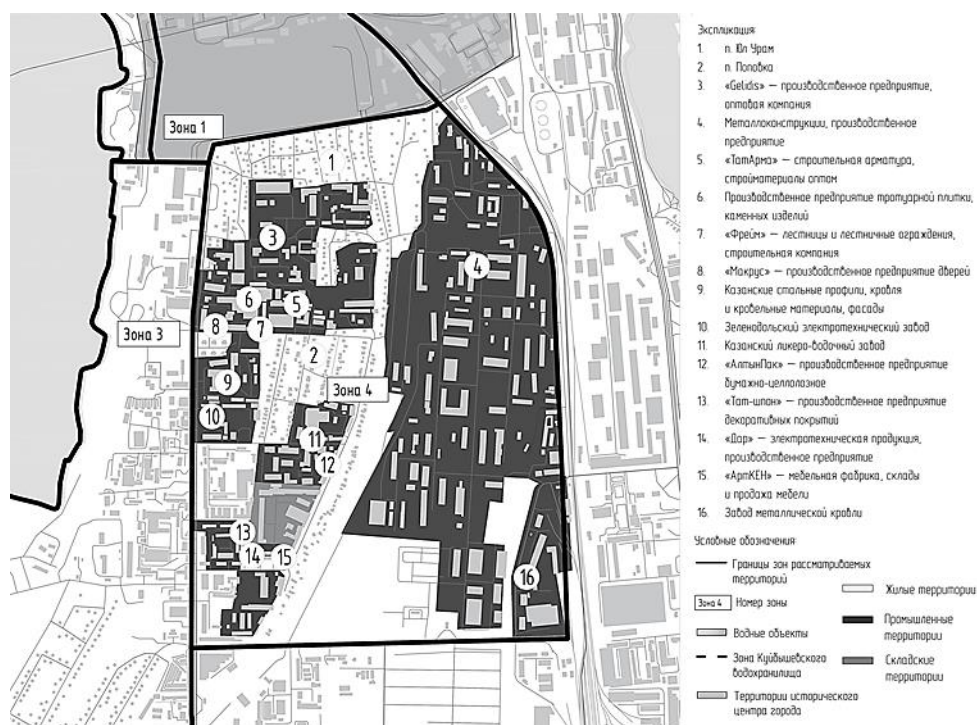


Рис. 7. Зона 4 рассматриваемых территорий
Fig. 7. Zone 4

Генпланом Казани до 2040 г. эти территории определены как зоны смешанного размещения производственных, коммунально-складских объектов и общественно-деловой застройки, зоны размещения производственных и коммунально-складских объектов I–II классов опасности и объектов коммунально-складского назначения. Также имеются зоны размещения озеленения специального назначения различного вида и территории индивидуальных жилых домов, которые становятся зонами рекультивации земель и перспективного использования территории, освоения территории при условии разработки ППТ.

В научной статье «Предпосылки формирования и развития речного порта Казани в его современных границах» М.Ш. Фазлеева и А.В. Ямаловой [6] рассматривается следующее: процесс формирования портовых территорий Казани и их влияние на развитие городской структуры; историческое возникновение речного порта и речного вокзала как композиционного центра; проблемы размещения таких зон вблизи центра города в условиях социально-экономических преобразований и перехода к постиндустриальному обществу. В статье отмечено, что центральная береговая зона утратила свое значение как исторически сложившаяся концентрация производственных территорий. При этом она сохранила заброшенные предприятия и коммунально-складские зоны, но приобрела социальное и рекреационное значение набережной Куйбышевского водохранилища.

В центральной части Казани, в районе речного вокзала, многие промышленные объекты прекратили свою деятельность и были перенесены. При этом, несмотря на сохранение ряда предприятий легкой промышленности, большая часть этих территорий остается неиспользуемой.

На основании анализа сделаны выводы о проблемах использования депрессивных промышленных и приречных территорий, граничащих с центром г. Казани.

1. Рассматриваемые территории изолированы от остальной части города: вдоль всей восточной границы проходит южная ветка железнодорожной инфраструктуры, которая существенно ограничивает транспортные связи.

Магистральные улицы, связывающие исследуемые территории с городом:

– ул. Татарстан – северная граница территорий; обеспечивает прямую связь с центром города (от речного вокзала);

– ул. Владимира Кулагина – проходит по центральной оси исследуемых территорий;

– ул. Магистральная – продольная улица, объединяющая указанные дороги.

Основная транспортная нагрузка приходится на эти три улицы. Центр города испытывает перегрузку, поскольку доступ на исследуемые территории возможен преимущественно через центр, а также рабочие места и рекреационные зоны сконцентрированы в центральной части города и практически отсутствуют на исследуемых территориях.

2. Проблема организации пешеходного движения: наличие множества тупиков пешеходных маршрутов, недостаток обустроенных площадей и зеленых насаждений, являющихся открытыми общественными пространствами.

3. Недостаток инфраструктуры внеуличного скоростного общественного транспорта: отсутствует метро, существующая трамвайная сеть ведет только по ул. Татарстан к речному порту и возвращается обратно. В местах пересечения ключевых транспортных потоков отсутствуют функциональные транспортно-пересадочные узлы, обеспечивающие связь с общегородским центром и рассматриваемыми территориями.

4. Территория городского центра, граничащая с исследуемыми территориями, имеет плотную историческую застройку, в основном рядовую квартальную. Ближе к ул. Татарстан, соединяющей городской центр с рассматриваемыми территориями, застройка переходит в квартальную и свободную, ближе к индустри-

альному кластеру. На исследуемых территориях строчная и периметральная застройка первой половины XX в. типовых среднеэтажных массовых серий, периметральная строчная и свободная с элементами групповой планировки застройка индустриального пласта, много пустых территорий. Внутриквартальные связи хаотичные, а по всем территориям расположены железнодорожные пути для провоза груза к предприятиям, многие уже не актуальные.

5. Невозможность использования занятых территорий под современные, более востребованные городским сообществом функции.

6. Недоступность набережной Волги и Куйбышевского водохранилища из-за наличия промышленных и складских территорий.

7. Проблема влияния депрессивных производственных территорий на экологическую ситуацию, сброс сточных вод, загрязнение окружающего ландшафта промышленными территориями.

В статье А.В. Пискаревой, В.А. Павловой, М.Н. Полещук, И.В. Клименко раскрывается проблема экологического каркаса [1], в труде Г.Н. Петришиной, М.Е. Селезневой, М.Н. Полещук – проблема реабилитации и современного использования депрессивных ландшафтов, учитывается определяющая роль водных объектов в формировании экологического каркаса города и их значительный рекреационный потенциал [2], что еще раз говорит о том, что производственные зоны с прибрежной территории необходимо расформировать, а оставшиеся территории нуждаются в преобразованиях и установлении связей с центром города.

Проанализированы тенденции перемещения производственных зон из центральной части Казани. Эти зоны имеют существенное значение для Казанской агломерации: наблюдается их перенос в активно развивающиеся логистические центры и технопарки на периферии города. При этом сохраняется транспортная доступность к Волжскому водному пути и железной дороге северного сообщения.

В научных работах И.В. Юсуповой, О.В. Пелевина, Р.М. Даутова «Критерии развития городских агломераций в контексте Стратегии-2030 Республики Татарстан» [3], Т.С. Хакимовой, Ю.А. Закоровой «Концепция долгосрочного территориального развития Казанской агломерации» [4] подчеркивается значимость стратегии развития Республики Татарстан. В рамках этой стратегии рассматриваемые территории и их промышленные зоны отнесены к Казанской агломерации, в состав которой входят Казань, Зеленодольск и Свияжск.

В статье А.Г. Хабибулиной и А.М. Хабибулиной «Анализ направлений развития логистических распределительных центров в градостроительной практике Республики Татарстан» приводится анализ современного состояния объектов логистической инфраструктуры в системе городских агломераций Республики Татарстан, необходимый для изучения возможности переноса промышленных объектов рассматриваемых территорий [5]. Согласно анализу, существуют и уже активно используются возможности и направления переноса существующих промышленных функций, исследуемых промышленных депрессивных территорий в системе Казанской агломерации: «Q-Park Казань», «Биек Тау», «Деловые линии», «Константиновский», «Свияжский межрегиональный мультимодальный логистический центр», «Тандер», «М-7», «Смарт Сити Казань», «Северные ворота», «Авиастроительный кластер» [5].

Согласно национальному проекту оздоровления Волги, существует возможность переноса поселков и жилых массивов с приречных депрессивных территорий южнее у протока Подувалье.

3. Градостроительный потенциал рассматриваемых территорий

Градостроительный потенциал левобережной части Волги, связанный с переносом производственных и жилых зон, используется для удовлетворения городских потребностей, что отражено в Генплане Казани до 2040 г. и Стратегии социально-экономического развития РТ и Казани до 2030 г.

Стратегия социально-экономического развития приоритетно ориентирована на пространственную трансформацию промышленных территорий, создавая условия для размещения кластеров на основе принципов информационных технологий, биотехнологических предприятий, центров исследований и разработок, способствующих развитию промышленного производства с использованием передовых технологий. У легкой промышленности модернизация не предусматривается – эти виды промышленности планируются к реорганизации, модернизации с повышением экологической безопасности и уменьшением их санитарно-защитных зон, которые поспособствуют развитию территорий вокруг этих пространств.

Рассматриваемые территории уже имеют некоторые зоны размещения образования, которые можно развить. Согласно данным заместителя министра образования и науки РТ, существует дефицит мест для проживания и образования студентов, который растет с каждым годом. В региональном межвузовском кампусе нуждаются технические высшие учебные заведения региона – КАИ, КНИТУ, КГЭУ и Минобрнауки РТ. Это возможность создания инновационного кластера на территориях.

Создание новых зеленых зон (парки, бульвары, скверы) позволит сформировать рекреационный кластер.

Территория прилегает к центру города, что дает возможность сбалансированного полицентрического развития для снижения нагрузки на центр и транспортную инфраструктуру [6, 7].

Согласно Генплану Казани до 2040 г., большая часть исследуемых территорий (зона 1, 3) предполагает изменение функциональных зон промышленных территорий на многофункциональную жилую зону, где могут появиться новые центры деловой и культурной активности. Новая функциональная зона большей части рассматриваемых территорий по Генплану Казани – зона смешанного размещения общественно-деловой и жилой застройки при условии последующей разработки ППТ. Это возможность создания общественно-жилого кластера.

Улицы Девятаева и Татарстан связывают западную и восточную части территории, а также обеспечивают связь с центром города (см. рис. 3). Необходимо добавление новых связей через железнодорожные пути. Возможность развития транспортной сети (метро, магистралей, трамвайной сети, транспортно-пересадочных узлов) отражается в Генплане Казани.

В статье А.А. Дембича и О.А. Балтусовой «Исторический центр Казани – между преобразованием и сохранением» говорится о «перспективном градостроительном каркасе как о дуалистической системе, состоящей из двух

обособленных, но взаимодействующих подсистем – два субкаркаса территории: административно-делового каркаса и рекреационно-ландшафтного каркаса [8, с. 123].

Первый субкаркас (АДК) – это «концентрация объектов административно-делового и эпизодического торгового назначения вблизи наиболее значимых транспортных магистралей» [8], а второй субкаркас (РЛК) – это «рекреационно-ландшафтный каркас, где формируется концентрация жилых зон, объектов питания, торговли повседневного уровня обслуживания и зеленых устройств, вблизи пешеходных коммуникаций» [Там же, с. 124]. «Связность АДК обеспечивается „деловым движением“, связность РЛК – „прогулочным движением“» [Там же, с. 123].

Взяв за основу данное исследование о «дуалистичной системе, состоящей из двух субкаркасов» и основы их формирования, а также анализ градостроительной проблематики и потенциала рассматриваемых территорий и их правовых возможностей, можно сказать, что потенциал использования этих территорий может быть развит благодаря созданию трех взаимосвязанных кластеров, в которые будут объединены новые функциональные зоны исследуемых территорий, которые развиваются у транспортно-пересадочных узлов для удобства и доступности (рис. 8).

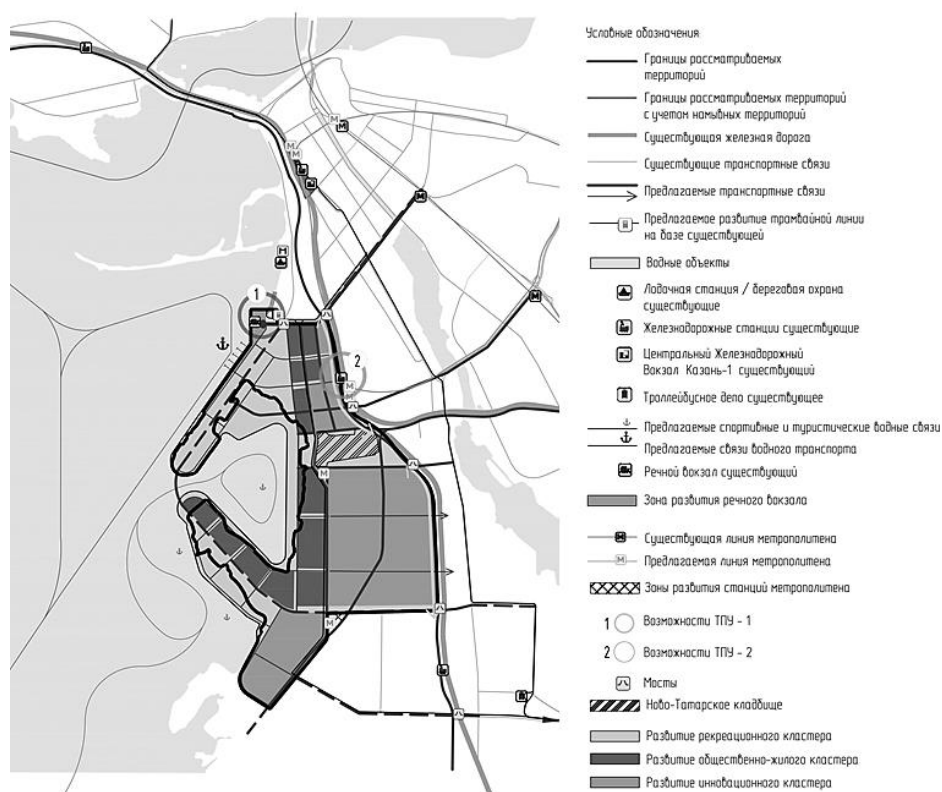


Рис. 8. Возможности использования рассматриваемых территорий
Fig. 8. Potential use of territories

Инновационный кластер – это гибкое территориальное объединение компаний, научно-исследовательских институтов, образовательных учреждений и иных организаций в смежных областях. Его ключевая задача – стимулировать инновационную деятельность и повышать конкурентоспособность региона.

Состав каркаса кластера определен на основе стратегий развития Казани, Республики Татарстан в целом, потребностей агломерационной политики (в частности, развития Казанской агломерации). Создание кластера позволит снизить нагрузку на центр города за счет появления новых рабочих мест.

Общественно-жилой кластер формируется на основе существующих жилых зон на рассматриваемых территориях с учетом потребности города в новом жилищном строительстве.

Согласно Генеральному плану Казани, зоны 1 и 3 отнесены к территориям многофункционального развития жилой застройки с высокой долей общественной функции. Это предполагает обеспечение жилой функции, развитие коммерческой деятельности, создание жилья различных типов и ценовых категорий, формирование развитой социальной инфраструктуры.

Рекреационный кластер формируется на основе территорий, обладающих уникальными природными ресурсами и культурно-историческим наследием. Его цель – устойчивое развитие туризма и улучшение качества жизни местного населения за счет сохранения окружающей среды, повышения экологической устойчивости прибрежных зон, потенциала развития речного вокзала, водных туристических маршрутов, развития спорта и развлекательных центров.

Возможности создания транспортно-пересадочных узлов на рассматриваемых территориях, позволяющие связать кластеры в единую систему:

- 1) зона речного вокзала, которая может быть определена как зона развития пассажирского речного вокзала, площадь пересадки на трамвайные и автобусные маршруты центральным транспортно-пересадочным узлом;
- 2) зоны у железнодорожных станций Вахитово и Тихорецкая в совокупности с предлагаемым Генпланом Казани – как зоны развития станций новой ветки метро. Ветка метро также соединяется станциями метро с железнодорожными станциями по всей восточной границе рассматриваемых территорий.

Заключение

Полный перенос промышленных предприятий рассматриваемых территорий из центра на окраину города либо за его границы не всегда может принести положительный эффект. Решением может стать частичный перенос промышленных предприятий, которые определены к выносу стратегией развития города или выгодны для агломерации региона, к которому относится город, а оставшуюся легкую промышленность модернизировать [9, 10].

Перенос промышленных предприятий с рассматриваемых территорий необходимо осуществлять на основании документов стратегического планирования – Стратегии развития г. Казани и Стратегии развития Республики Татарстан. При этом следует уделять особое внимание развитию Казанской агломерации, где формируются новые либо развиваются существующие промышленные и логистические центры.

Аналогичный подход требуется для приречных территорий, на которых расположены складские объекты, участки индивидуального жилищного строи-

тельства, заброшенные предприятия с действующими санитарно-защитными зонами, многочисленные рынки, объекты розничной торговли, а также коммунально-хозяйственные и деловые зоны.

На исследуемых территориях целесообразно сформировать многофункциональные зоны с максимальным сохранением рабочих мест на предприятиях, которые экономически невыгодно переносить либо которые не имеют перспективных площадок для размещения на городской периферии или за пределами города.

На территориях, где в настоящее время располагаются промышленные объекты, намеченные к переносу, могут быть предусмотрены новые функциональные зоны приложения труда, зоны туристической и жилой привлекательности. Необходимо достичь возможности баланса между промышленной и городской структурой города в целом за счет связанных между собой трех кластеров исследуемых территорий, формируемых у транспортно-пересадочных узлов: инновационный кластер передовых технологий, образования, общественно-жилой кластер на базе существующей жилой застройки, а рекреационный кластер за счет имеющегося водно-экологического потенциала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пискарева А.В., Павлова В.А. Эстетизация как подход к реабилитации депрессивного ландшафта // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023. № 2 (63). С. 218–236. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-218-236
2. Полещук М.Н., Клименко И.В. Развитие общественных пространств в прибрежных зонах крупнейших городов Поволжья // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022. № 2 (59). С. 225–244. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-225-244
3. Юсупова И.В., Пелевин О.В., Даутов. Р.М. Критерии развития городских агломераций в контексте стратегии-2030 Республики Татарстан // *Вестник КГЭУ*. 2019. № 4. С. 103–111.
4. Хакимова Т.С., Закирова Ю.А. Концепция долгосрочного территориального развития Казанской агломерации // *Известия КГАСУ*. 2020. № 4 (54). С. 172–182.
5. Хабибуллина А.Г., Хабибуллина А.М. Анализ направлений развития логистических распределительных центров в градостроительной практике Республики Татарстан // *Известия КГАСУ*. 2016. № 4 (38). С. 192–199.
6. Бобрышев Д.В., Вершинина С.В. Интеграция прибрежных территорий в функционально-планировочную структуру города как необходимое условие их устойчивого развития // *Вестник РГТУ*. 2014. № 12 (95). С. 103–107.
7. Дембич А.А., Закирова Ю.А., Латыпова М.С. Казань – ресурсы и перспективы полицентричного развития // *Известия КГАСУ*. 2017. № 3 (41). С. 57–65.
8. Дембич А.А., Балтусова О.А. Исторический центр Казани – между преобразованием и сохранением // *Известия КГАСУ*. 2022. № 3 (61). С. 119–129. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_119
9. Быстрова Т.Ю. Реабилитация промышленных территорий городов: теоретические предпосылки, проектные направления // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2013. № 3. С. 21–25.
10. Котенко И.А., Токарева В.А. Реновация бывших промышленных территорий // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2015. № 3 (20). С. 47–52. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.03.6

REFERENCES

1. Piskareva A.V., Pavlova V.A. Aestheticization as Approach to Rehabilitation of Depressed Landscape. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023; 2 (63): 218–236. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-218-236 (In Russian)
2. Poleshchuk M.N., Klimenko I.V. Development of Public Spaces in Coastal Zones of the Largest Cities of the Volga Region. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022; 2 (59): 225–244. DOI: 10.24412/1998-4839-2022-2-225-244 (In Russian)

3. Yusupova I.V., Pelevin O.V., Dautov R.M. Criteria for the Development of Urban Agglomerations in the Context of the Strategy-2030 of the Republic of Tatarstan. *Vestnik KGEU*. 2019; (4): 103–111. (In Russian)
4. Khakimova T.S., Zakirova Yu.A. Concept of Long-Term Territorial Development of the Kazan Agglomeration. *Izvestiya KGASU*. 2020; 4 (54): 172–182. (In Russian)
5. Khabibullina A.G., Khabibullina A.M. Analysis of Development Directions for Logistics Distribution Centers in Urban Planning Practice of the Republic of Tatarstan. *Izvestiya KGASU*. 2016; 4 (38): 192–199. (In Russian)
6. Bobryshev D.V., Vershinina S.V. Integration of Coastal Territories into the City Functional and Planning Structure as a Necessary Condition for Sustainable Development. *Vestnik RGTU*. 2014; 12 (95): 103–107. (In Russian)
7. Dembich A.A., Zakirova Yu.A., Latypova M.S. Kazan: Resources and Prospects for Polycentric Development. *Izvestiya KGASU*. 2017; 3 (41): 57–65. (In Russian)
8. Dembich A.A., Baltusova O.A. Historical Center of Kazan: Transformation and Preservation. *Izvestiya KGASU*. 2022; 3 (61): 119–129. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_119_119 (In Russian)
9. Bystrova T.Yu. Rehabilitation of Urban Industrial Territories: Theoretical Prerequisites, Project Directions. *Academicheskii Vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2013; (3): 21–25. (In Russian)
10. Kotenko I.A., Tokareva V.A. Renovation of Former Industrial Territories. *Vestnik SGASU. Urban Planning and Architecture*. 2015; 3 (20): 47–52. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.03.6 (In Russian)

Сведения об авторах

Вайтенс Андрей Георгиевич, докт. архитектуры, профессор, член Союза архитекторов России, член-корреспондент РААСН, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, avaytens@gmail.com

Матвеева Алена Андреевна, магистрант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, allenandreevna@yandex.ru

Authors Details

Andrey G. Vaitens, DSc, Professor, Member of the Union of Architects of Russia, Corresponding Member RAACS, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, avaytens@gmail.com

Alena A. Matveeva, Graduate Student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, allenandreevna@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 20.11.2025
Одобрена после рецензирования 24.11.2025
Принята к публикации 30.11.2025

Submitted for publication 20.11.2025
Approved after review 24.11.2025
Accepted for publication 30.11.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 101–119.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 101–119.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-101-119

EDN: JRSJEV

ЭВОЛЮЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ГОРОДСКИХ УЛИЦ СИБИРСКОГО РЕГИОНА (XX–XXI ВЕКА)

Дмитрий Викторович Карелин, Мария Сергеевна Тырышкина

Новосибирский государственный

архитектурно-строительный университет (Сибстрин),

г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В условиях быстрых темпов развития городских территорий и их непосредственного взаимодействия с естественными системами нарушается баланс антропогенных и природных систем. Анализ хронологии инженерного благоустройства городов Западной Сибири позволяет создать базу знаний об особенностях территорий и установить взаимосвязь между функциональными и эстетическими характеристиками городской среды.

Цель. Выявить основные этапы развития инженерного благоустройства городов Западной Сибири (Бийск, Томск, Омск), соотнести хронологию развития и выявить характерные особенности формирования городских территорий и их инфраструктур.

Материалы и методы. Комплексный и графоаналитические подходы, систематизация архивных источников и картографического материала.

Результаты и выводы. В результате проведения хронологического анализа выявлены основные направления развития городов в период с 1930-х гг. по настоящее время. Сделан вывод об общих особенностях эволюции инженерного благоустройства, определены основные этапы его развития.

Ключевые слова: инженерное благоустройство, города Западной Сибири, покрытие дорог и тротуаров, озеленение, малые архитектурные формы, инженерная инфраструктура, освещение

Для цитирования: Карелин Д.В., Тырышкина М.С. Эволюция инженерного благоустройства городских улиц Сибирского региона (XX–XXI века) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 101–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-101-119. EDN: JRSJEV

ORIGINAL ARTICLE

**ENGINEERING SERVICES AND EQUIPMENT
OF STREETS IN THE SIBERIAN REGION
IN THE 17th AND EARLY 20th CENTURIES****Dmitrii V. Karelin, Mariya S. Tyryshkina***Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russia*

Abstract. A rapid urban development and interaction with natural systems, disrupt the balance between anthropogenic and natural systems. The chronology of the development of engineering landscaping in Western Siberia cities makes it possible to create a database on territories and determine the dependence between functional and aesthetic qualities of the environment.

Purpose: Identification of the main development stages of engineering services and equipment of cities in Western Siberia (Biysk, Tomsk, Omsk). Correlation between the development chronology and identification of characteristics of the formation of urban areas and their infrastructures.

Methodology: Integrated and analytical approaches, systematization of archival documents and cartographic materials.

Research findings: The main directions of the urban development in the period from the 1930s to present days are identified. The general evolution of engineering landscaping and its main development stages are determined.

Keywords: engineering improvement, cities of Western Siberia, covering roads and sidewalks, landscaping, small architectural forms, engineering infrastructure, lighting.

For citation: Karelin D.V., Tyryshkina M.S. Engineering Services and Equipment of Streets in the Siberian Region in the 17th and Early 20th Centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2026; 28 (1): 101–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-101-119. EDN: JRSJEV

Введение

Завершение второго этапа промышленной революции сформировало предпосылки массового производства промышленных изделий, являющихся одним из основных факторов возможностей реализации планов по санитарному обеспечению территорий.

Инженерное благоустройство городских территорий – сложный многокомпонентный процесс, охватывающий все строительные работы, связанные с поверхностью и объектами, находящимися ниже планировочной отметки земли. Нами были рассмотрены первые этапы эволюции благоустройства трех городов Сибирского региона (Томск, Омск, Бийск) с момента их образования и до начала Первой мировой войны (1914–1918 гг.) и Революции (1917 г.) [1].

Начало XX в. характеризуется активным развитием городов в связи с индустриализацией и урбанизацией. Население близлежащих поселений постепенно мигрирует в городские образования, увеличивается рост промышленности. При этом улицы городов, отдаленных от центральной части России, нередко имели низкое развитие инженерной обеспеченности коммунально-транспортной инфраструктурой: грунтовые дороги, отсутствие систем водоснабжения, водоотведения и электроснабжения.

Российские города, находясь в полной самобытности, базировались на опыте развития европейских городов и, соответственно, их управлении. Основными направлениями развития являлись водоснабжение, освещение, трамваи, электричество, газовое хозяйство [2].

Для всей территории России в период XX–XXI вв. можно выделить несколько этапов развития инженерного благоустройства городских улиц.

1. Начало XX в. Этап характеризуется активным развитием городских улиц, устройством первых систем водоснабжения и бытовой канализации с регулированием санитарно-эпидемиологических условий застройки.

2. 1920–30-е гг. В послереволюционный период происходит полная реконструкция и преобразование городских территорий, наблюдается утилитаризм архитектурных концепций и переход к функциональности объектов.

3. 1940–50-е гг. В годы первых пятилеток наблюдается недостаток ресурсов, вследствие чего появляется востребованность в простых и эффективных решениях, активно повышается рост массового строительства типового жилья и развития транспортной инфраструктуры.

4. 1960–80-е гг. Данный период характеризуется упрощением архитектурных форм и массовым благоустройством. В связи с формированием новых технологий и их методологий растут темпы строительства, появляется вариативность архитектурных и конструктивных решений.

5. 1990-е гг. В период перехода к рыночной экономике изменяются подходы к благоустройству городских улиц, увеличение частных инвестиций приводит к росту количества архитектурных бюро и, соответственно, многообразию проектных подходов.

6. Начало XXI в. Современное благоустройство городских улиц характеризуется эффективным и качественным управлением городской инфраструктурой. Появление технологий «умного города» является следствием концепций устойчивого развития и экологически чистой городской среды.

Исходя из общей хронологии развития инженерного благоустройства городских улиц выявлена корреляция исторических событий (экономические и политические) и формирования облика городов вследствие их адаптивности к требованиям. При этом становление современного благоустройства неразрывно связано не только с происходящими событиями, но и с активным ростом интеграции природно-технических систем, апробации методологических подходов и нормативно-правовых трансформаций в проектировании в целом.

При этом проектирование инженерного благоустройства в период XX–XXI вв. неразрывно связано с формированием нормативно-правовой базы, которая начала активно пополняться с утверждением первого издания строительных норм и правил (СНиП) в 1955 г. В дальнейшем система СНиП была актуализирована и расширена в 1960–80-х гг. [3].

В условиях сокращения сроков инвестиционно-строительных циклов, галопирующих темпов строительства, модернизации и динамичной поливалентности систем коммунального хозяйства, формирования комфортной городской среды становится необходимым преобразование и актуализация подходов к организации инженерного благоустройства городских территорий. Методологическая база благоустройства в настоящее время носит дисперсный характер

и формируется на основе принципов, заложенных в постсоветский период в области градостроительства, инженерной подготовки городских территорий, озеленения, организации улично-дорожной сети, инженерной защиты территорий от природных факторов, функциональности малых архитектурных форм, планировки городских коммуникаций.

Для анализа современной методологической базы и дальнейшей ее актуализации необходимо иметь базу знаний о том, как развивались и формировались городские территории. В статье рассмотрены:

- Алтайский край (г. Бийск);
- Томская область (г. Томск);
- Омская область (г. Омск).

Группа представленных городов расположена в юго-западной части Сибири и характеризуется континентальным климатом с выраженными сезонами. Зимний сезон в Юго-Западной Сибири продолжительный и холодный, снежный покров устойчив. Летние месяцы теплые, температура воздуха достигает 30 °С, периодически возможны сильные дожди. Осадки в течение года распределены неравномерно и составляют 400–600 мм в год [4].

Климатические параметры оказывают значительное влияние на градостроительное развитие и функциональное зонирование городских территорий.

Этапы формирования инженерного благоустройства городов

Бийск согласно классификации городов по численности населения является большим городом в Алтайском крае, население которого к началу XXI в. насчитывало свыше 180 тыс. чел. К началу XX в. город приобрел статус остановочного пункта по Чуйскому тракту и являлся связующей точкой между торговыми поставками Китая и центральной части России. Застройка города, как и в других сибирских городах, отражала особенности периода модернизации, региональную идентичность и климатические особенности. Центр сформирован преимущественно купеческими домами, торговыми рядами и пассажами, периферия города отражала хаотичную застройку деревянными домами, которые не сохранились до настоящего времени [5].

Бийск территориально расположен на двух берегах р. Бии. В отличие от быстроразвивающейся правой части города, рост левобережья начался только в XX в. Заречная часть долгое время представляла собой скопление дачных поселков. В отличие от центральной части, преимущественно находящейся в болотистой местности, экосистема левого берега имела большинство преимуществ: сосновый бор, песчаный берег, чистый лесной воздух [6].

Начало XX в. Революция 1917 г. не внесла в динамику планировочного развития города принципиальных изменений, процесс увеличения территорий шел постепенно и достаточно медленно, к концу 20-х гг. XX в. в структуре города появилось лишь несколько промышленных предприятий. На рубеже 1920–30-х гг. темп строительства увеличился в связи с новым направлением архитектуры – конструктивизмом, основанным на принципах целесообразности, утилитарности и стандартизации [7]. В данный период было построено два важных объекта – окружная больница и центральная электростанция.

Несмотря на то что г. Бийск являлся уездным городом, к началу XX в. он уже был электрифицирован, при этом в дореволюционный период только три города в Сибири в своей структуре имели электростанции (Красноярск, Томск и Бийск). В конце 1912 г. с наступлением сумерек и до двух часов ночи освещение присутствовало на главных улицах: ул. Успенской (в настоящее время ул. Советская), ул. Барнаульской (проспект Кирова), ул. Александровской (Красноармейская), ул. Торговой (ул. Льва Толстого). В начале 1930-х гг. электростанция была переоборудована, однако освещение все также присутствовало только в центральной части города, весной 1935 г. был проведен глубоководный кабель по дну р. Бии, в связи с чем началась электрификация за-речной части [8].

Этап 1960–80-х гг. В начале 1960-х гг. центральные улицы города (ул. Советская и Льва Толстого) благоустроены (покрытие дорог и тротуаров), однако за счет активного пешеходного трафика и недостатка малых архитектурных форм (урн и скамьей) санитарное состояние улиц характеризовалось как неудовлетворительное. Близлежащие улицы также представляли собой территории с низким уровнем благоустройства. За счет климатических параметров в осенний и весенний периоды в условиях отсутствия твердого покрытия и болотистой местности улицы были размыты, частично затоплены, пешеходные пути загрязнены.

В обозначенный ранее период границы города расширяются за счет присоединения двух районов: Мочище и поселок химиков. На территории районов были вырублены леса, осушены болота, чтобы организовать площадку новой бийской промзоны и жилье для рабочих [9].

В 1954 г. формируется новый проект по благоустройству городской среды «Зеленое кольцо вокруг Бийска», в основу которого было заложено озеленение верхней террасы города. Проект предполагал уменьшение темпов овражной эрозии, предотвращение пыли и улучшение санитарного состояния, однако реализована была лишь часть – первое кольцо, высажены древесно-кустарниковые насаждения: ясени, березы и кустарниковые породы.

В 1958 г. было принято решение о создании нового предприятия оборонной промышленности – НИИ-9. В сосновой роще на берегу р. Бии к юго-западу от города начинается строительство поселка ученых для работников нового предприятия. Первоначально поселок был разделен на два квартала «АБ» и «ВГ», именно первое название закрепилось за районом, который в настоящее время является наиболее густозаселенным [9].

Одноэтажные хаотично расположенные постройки по ул. Ленина в центральной части города постепенно демонтировались. В связи с формированием нового подхода к проектированию и введению программы по строительству типового жилья в г. Бийске увеличивается объем возводимого крупнопанельного домостроения. В 1970-х гг. ул. Ленина приобретает новый фасад, сохранившийся до настоящего времени и состоящий из пятиэтажных и девятиэтажных домов [10]. Современный облик центральная часть города приобрела только в 1970-х гг., когда на ул. Ленина были построены горисполком (в настоящее время здание администрации), кинотеатр «Алтай» и заложен сквер на бульваре (ныне Петровский бульвар).

В период 1960–70-х гг. начинается активный рост индустриального домостроения, архитектура предполагала простоту внешнего вида и функциональность, что позволяло решить проблему острого недостатка жилья [11]. По типовым проектам в г. Бийске был возведен район «Зеленый клин». Поскольку такие дома носили временный характер и имели низкий срок эксплуатации, то и стоимость была относительно низкая. В данный период был основан Городской сад по ул. Льва Толстого, ставший центральным местом отдыха населения.

Необходимо отметить, что на развитие г. Бийска повлияло строительство нескольких промышленных комплексов: сахарный завод, беконная фабрика, авторемзавод, «Электропечь», «Продмаш», «Молмаш», Николаевская обувная фабрика, Речицкая спичечная фабрика, «Сибприбормаш». Наиболее важным объектом стал Бийский химический комбинат (БХК) – крупнейшее градообразующее предприятие. Однако в постсоветский период 1990-х гг. объемы производства падают, большинство предприятий закрывается. В настоящее время функционирующими промышленными комплексами на территории города являются Олеумный завод (дочерняя компания БХК), «Сибприбормаш», «Эвалар» и «Алтайвитамины».

В конце 1960-х гг. Бийск приобретает статус не только промышленного, но и туристического города. В связи с благоприятным расположением территории и непосредственной близостью Республики Алтай, через г. Бийск организовываются туристические маршруты, как водные, так и пешие.

Период 1980–90-х гг. характеризовался стабилизацией городского хозяйства, однако плановая экономика ограничивала возможности крупных преобразований, в данный период были проведены незначительные мероприятия по озеленению города, ремонту и расширению транспортной инфраструктуры.

К концу 1980-х гг. город становится крупным промышленным и научным центром, однако с переходом к рыночной экономике происходит реорганизация большинства предприятий и деградация городской среды. В период 1990-х гг. ухудшается визуальный облик города, программы по благоустройству останавливаются в связи с отсутствием финансирования. 1990-е гг. стали временем стагнации г. Бийска, однако именно этот период сформировал основные предпосылки для будущих преобразований.

Начало XXI в. В период 2000–2010-х гг. с началом экономического роста в России в г. Бийске восстанавливается промышленность, что способствует притоку инвестиций, реконструируются центральные улицы города и набережная р. Бии, появляются новые спортивные объекты (рис. 1). Благоустройство города заняло много лет.

К концу 1930-х гг. некогда крупнейший экономический и культурный центр Сибири г. **Томск** значительно отставал в развитии от соседних городов (Новосибирск, Барнаул, Кемерово). В данный период на территории города действовало 35 промышленных предприятий и 44 кооперативно-промысловых артели. При этом к концу 1930-х гг. были сформированы основные оси развития железнодорожной, автомобильной и водной инфраструктур.

Электрификация г. Томска берет свое начало в 1895 г., однако перед событиями Великой Отечественной войны городская электростанция обеспечивала лишь 2/3 необходимого объема электроэнергии. Введенная в эксплуата-

цию в 1906 г. система централизованного водоснабжения не соответствовала санитарно-эпидемиологическим нормам и обеспечивала лишь треть потребителей. Большая часть городской застройки представляла собой неблагоустроенные индивидуальные жилые дома [12].

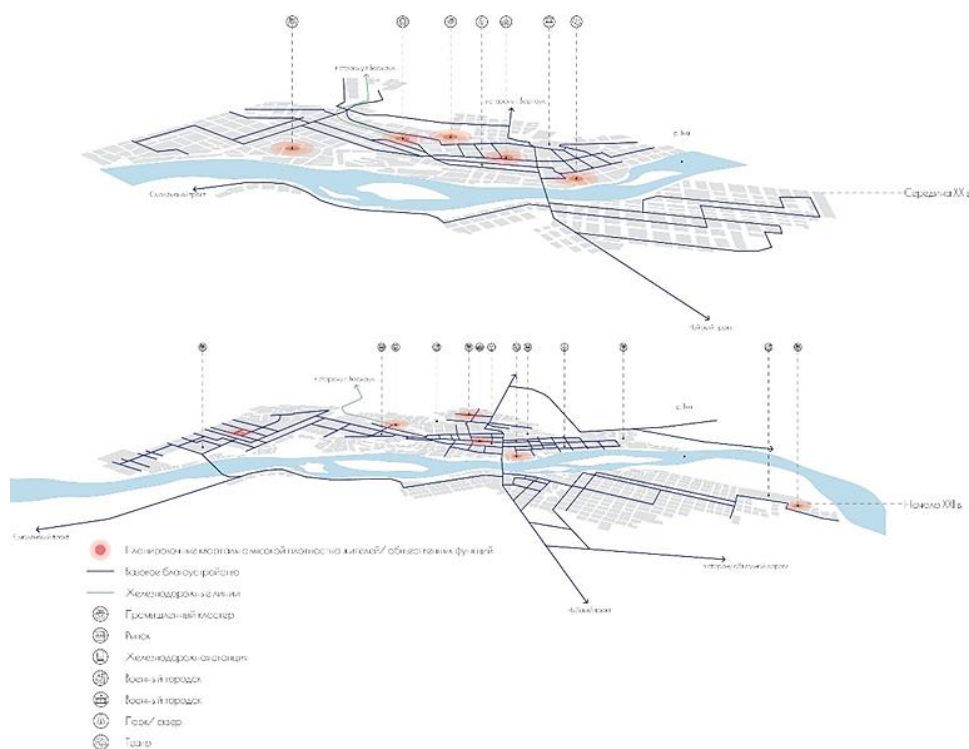


Рис. 1. Эволюция инженерного благоустройства городских территорий в г. Бийске в середине XX в. и начале XXI в.

Fig. 1. The evolution of engineering services and equipment of urban areas in Biysk in the middle of the 20th and early in the 21st centuries

Этап 1940–50-х гг. В 1939 г. был принят новый генеральный план г. Томска, предусматривающий несколько важных градостроительных изменений: изменение русла р. Ушайки, объединение небольших кварталов в более крупные, формирование двух крупных магистралей в южной части города (рис. 2).

Непосредственно на развитие города и, соответственно, бюджетирование проектов благоустройства повлияло увеличение промышленного производства. В период с 1941 по 1944 г. велось строительство крупнейшей железнодорожной магистрали Сибири – Томской железной дороги, было построено 15 кольцевых маршрутов для перевозки топлива. К 1944 г. обороты промышленности в г. Томске возросли практически в 3,6 раза по сравнению с довоенным периодом [13].

Этап 1960–80-х гг. В 1955 г. были проведены первые корректировки генерального плана, в соответствии с которыми предполагалось формирование промышленного кластера на севере города, зонирование этажности застройки, сохранение историко-культурной части города, переход к радиально-кольце-

вой системе транспортной коммуникации. На рубеже 1950–60-х гг. предполагалось, что развитие городских территорий должно вестись в сторону расширения административно-хозяйственных границ и, соответственно, освоения новых территорий без значительных изменений исторического центра [14].

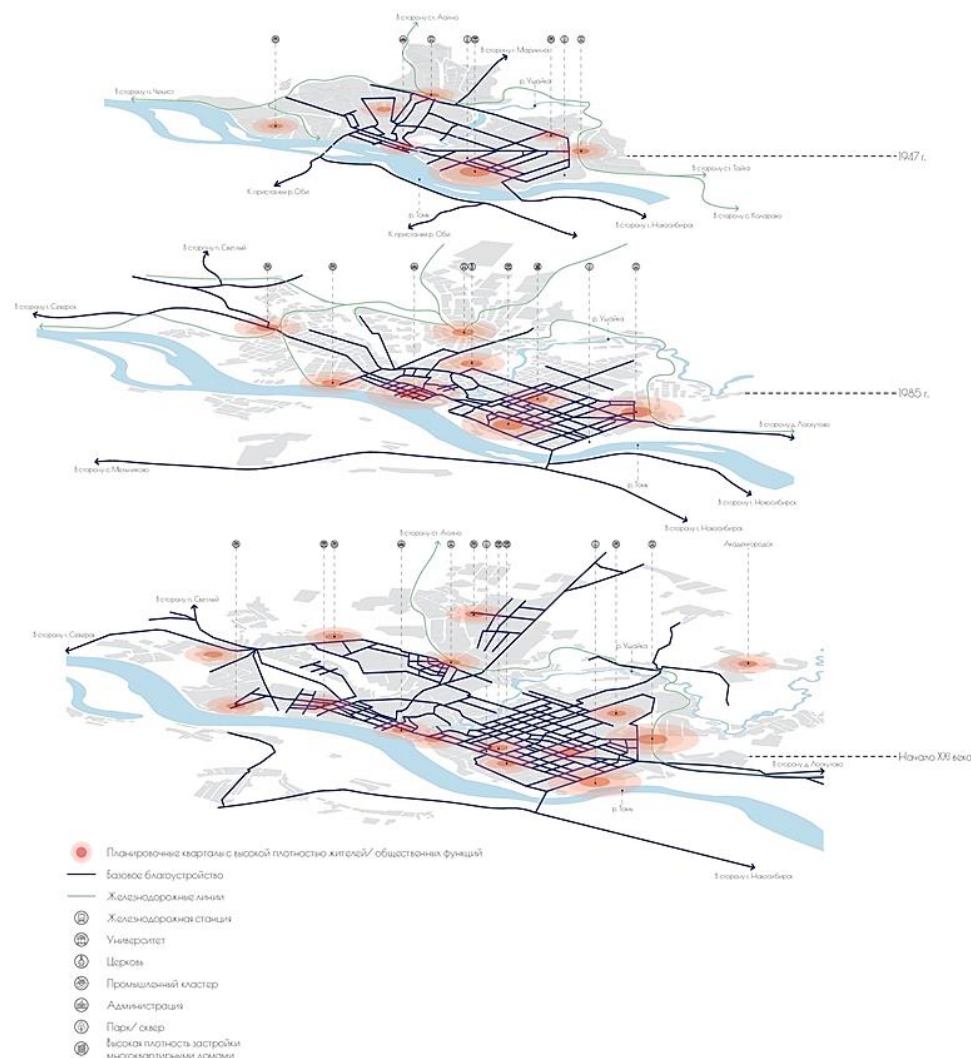


Рис. 2. Эволюция инженерного благоустройства городских территорий в г. Томск в 1947 г., 1985 г. и начале XXI в.

Fig. 2. The evolution of engineering services and equipment of urban areas in Tomsk in 1947, 1985 and in the 21st century

В 1967 г. был утвержден новый генеральный план г. Томска, который полностью отражал идеологию и тенденцию градостроительного планирования по всей России. Обновленный генеральный план предполагал развитие города на восток со строительством новых жилых территорий, промышленный кластер при этом сохранял свое положение на севере города [15].

В середине 1970-х гг. в градостроительную политику города введены два новых понятия: район и микрорайон, – в соответствии с которыми формировались административно-территориальные границы.

В период действия генерального плана 1967 г. построены томский Академгородок (двойник новосибирского Академгородка, построенного в 1957 г.), жилые районы Каштак и Иркутский тракт в северной и северо-восточной частях города [15].

Большинство улиц оставались не оборудованными под нужды пешеходов, отсутствовало покрытие тротуаров. Кроме того, обострилась проблема экологического состояния города. Большое количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и р. Томь обусловлено активной работой предприятий промышленных комплексов (химические и машиностроительные заводы), в данный период наблюдалось сокращение городских лесов из-за расширения хозяйственных границ города. В конце 1980-х гг. были проведены воздухоохраные мероприятия и уменьшено количество вредных выбросов с предприятий [12].

С середины XX в. на территории г. Томска формируется сеть ливневой канализации, состоящая из подземных самотечных трубопроводов и открытой дренажной системы.

Этап 1980–90-х гг. В 1980-е гг. в Томске активно развивается крупнопанельное домостроение в целях увеличения жилой площади, запроектированы два крупных микрорайона: Центральный и Солнечный (рис. 2). Однако в связи переходом к рыночной экономике и распадом Советского Союза реализация комплексного строительства была приостановлена, при этом фрагментарная застройка продолжала развиваться.

В связи с развитием многоэтажного строительства в центральной части города возникла необходимость в сохранении историко-архитектурной среды, в 1987 г. впервые утвержден проект охранных зон, который включал в себя установление зон охраны памятников архитектуры, зон регулирования застройки, зон сохранения естественных ландшафтов.

Этап 1990-х гг. На рубеже веков 1990-е гг. характеризуются отсутствием системного подхода к благоустройству городских территорий. С переходом к рыночной экономике, как и другие крупные города России, г. Томск находился в состоянии стагнации. Финансирование проектов по развитию и модернизации инфраструктуры и благоустройства были сокращены и остановлены. В период экономического кризиса наблюдались высокий износ водопроводных и канализационных сетей, отсутствие современных систем очистки воды и утилизации отходов, износ энергетической инфраструктуры (тепловые и слаботочные сети). За отсутствием финансирования качество городской среды также снизилось: разрушение дорожного полотна и покрытия тротуаров, потеря привлекательности общественных пространств, санация древесно-кустарниковых насаждений.

Начало XXI в. Динамичное развитие начинается с 2000-х гг., восстанавливается экономическая ситуация в стране, г. Томск постепенно модернизируется за счет реализации мероприятий по реконструкции центральных улиц с обновлением покрытия тротуаров и установкой новых мачт освещения, благоустройству набережной р. Томи, реконструкции и высадке новых растений на территории Городского и Лагерного садов, реконструкции и замене участков тепловой сети

в условиях минимизации тепловых потерь, строительству новых очистных сооружений и модернизации систем водоснабжения и водоотведения.

В 2007 г. проводятся мероприятия по восстановлению исторического парка, находящегося на территории Томского государственного университета, благоустраивается въезд вблизи Научной библиотеки, на центральной аллее формируется система зеленых насаждений. В 2010-е гг. благоустройство г. Томска приобретает системный подход, реализуются крупные проекты по формированию городской среды (рис. 2). В данный период проводится реконструкция площади Ленина, устанавливаются малые архитектурные формы, обновляется покрытие.

В настоящее время градостроительная политика г. Томска направлена на устойчивое развитие городских территорий, которое включает в себя три аспекта: экономический, социальный и экологический. Такая тенденция развития предполагает симбиоз антропогенной и природной систем.

Географически **г. Омск** расположен на плоской равнине. Город, открытый для ветровых потоков, в летний период сталкивается с проблемами пыли, зимой – с сильными буранами. Природный ландшафт включает в себя березовые рощи, болота (в особенности в левобережной части) и кустарники. В связи с этим Омск требует активного искусственного озеленения.

Сложившаяся в довоенные годы часть г. Омска представляла собой небольшой вытянутый массив по правому берегу р. Иртыш. В начале 1930-х гг. в состав города вошли Атаманский хутор, Селиверстовский поселок, ст. Омск, п. Куломзино, п. Порт-Артур и п. Черный городок, тем самым расширив административно-хозяйственные границы городских территорий. В связи с этим планировочная структура г. Омска из децентрализованной превратилась в линейную с четкими границами и точками притяжения [16].

Начало XX в. Концепция «город-сад» была заложена еще в довоенный период, однако по состоянию на 1932 г. процент озеленения достигал 0,85 % от общей площади города. В условиях Гражданской войны, эпидемии и сниженного санитарного благополучия в структуре городской среды отсутствовало качественное и функциональное обустройство общественных пространств (улиц, парков, скверов и т. п.).

В 1935–1937 гг. разрабатывается первый генеральный план г. Омска, которым предусматривалось повышение плотности застройки правобережной части, т. к. средняя этажность в данный период составляла 1,07 [17].

К середине 1930-х гг. Омск требовал рациональных коммуникаций. В 1936–1937 гг. проложены первые трамвайные линии, соединившие центральную часть города с вокзалом. Расширение системы общественного транспорта формировалось активно, общая протяженность трамвайных путей составляла 24 км. В довоенный период большинство территорий города представляло собой малоэтажную застройку, состоящую на 2,5 % из каменных зданий, 5 % – смешанных и 64 % – деревянных. Несмотря на нарастающие политические и экономические проблемы, в стране в предвоенные годы активно шли работы по благоустройству городской среды (рис. 3), была расширена водопроводная и канализационная системы [18].

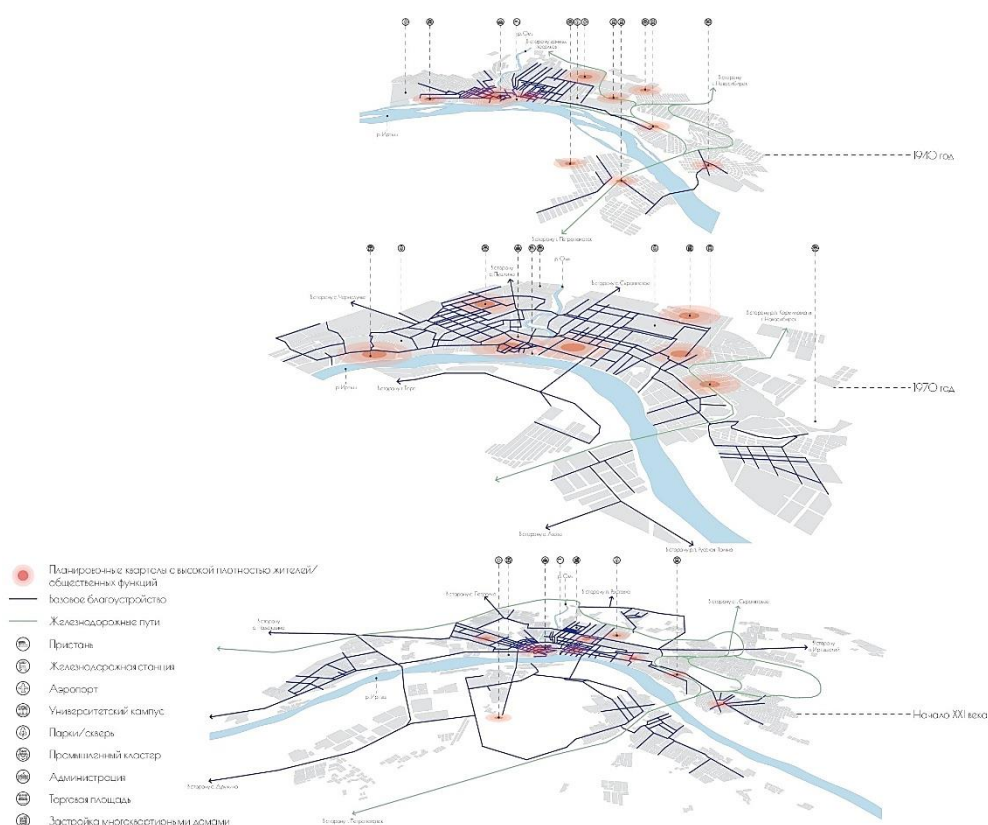


Рис. 3. Эволюция инженерного благоустройства городских территорий в г. Омске в 1940 г., 1970 г. и начале XXI в.

Fig. 3. The evolution of engineering services and equipment of urban areas in Omsk in 1940, 1970 and in the 21st century

В 1930-е гг. озеленение территории города носило массовый характер. В условиях активной борьбы с экологическими проблемами был заложен сад Пионеров, открыт Центральный парк культуры, реализован проект по высадке древесно-кустарниковых насаждений между ул. Ленина и Маркса от ул. Короленко до берега р. Оми.

К 1947 г. Омск имел в своей структуре 2100 га зеленых территорий, большинство из которых представляли собой загородные рощи, в границах центральной части города лишь 217 га были озеленены. Реализация концепции «город-сад» началась в 1953 гг., однако широкомасштабные работы были организованы только ко второй половине 1950–60-х гг. [19]. К 1965 г. площадь зеленых насаждений в границах городской черты достигла 6169 га, при этом в центральной части города (ул. Ленина, сквер Дзержинского) высаживались нетипичные для сибирского климата растения: туи, драцены, кипарисы и пальмы. В 1968 г. были внесены изменения в генеральный план города с перспективой озеленения на 20 лет, при этом к концу 80-х гг. XX в. в Омске было организовано 5 крупных парков: парк Победы, ПККиО им. 30-летия ВЛКСМ,

ПКиО Советского округа, Парк сельхозинститута и КСК «Зеленый остров» – общей площадью 427,5 га.

Этап 1950–60-х гг. Из-за отсутствия мостовых переходов освоение левобережной части началось только в 1950–60-х гг., при этом численность населения достигала уже порядка 460 тыс. чел. Осуществление компактной многоэтажной застройки во многом затруднялось дорогостоящими мероприятиями по инженерной подготовке территории: ликвидация оврагов, торфяных болот, подтопляемых территорий, занимающих большие площади в центральном районе города. Именно поэтому большая часть территории города была занята малоэтажной застройкой [17].

Быстрый рост промышленности определял темпы роста города, а новое направление в градостроительной практике России привело к изменениям в приемах планировки и застройки. Внедрение массового индустриального строительства и появление понятий «микрорайон» и «район» привели к укрупнению городской территории и изменению ее структуры.

Необходимо отметить, что в период 1950–60-х гг. на территории города устанавливались местные малые архитектурные формы: шестиметровые садовые диваны с железобетонными опорами, высокие светильники в виде ребристых колонн [16].

В конце 1960-х гг. омская промышленность состояла из основных отраслей: предприятий сельскохозяйственного машиностроения, пищевой и легкой промышленности, оборонной промышленности, химической и нефтехимической отрасли. К концу 1960-х гг. Омск становится одним из самых крупных индустриальных центров в Сибири, в 1970-е гг. промышленность города возрастает за счет ввода в эксплуатацию новых предприятий, увеличения производительности труда и внедрения новых методов работы.

Этап 1960–80-х гг. В рассматриваемый период железные дороги Омской области имели общую протяженность около 900 км, в городе располагались вагонные и электровозные депо, нарастает темп грузоперевозок по железнодорожным и водным транспортам. К концу 1980-х гг. Омск уже имел связь со всеми областными и краевыми центрами России по авиалиниям. В самом городе активно развиваются трамвайные и троллейбусные линии, которые связывают несколько городских районов (рис. 3).

В период 1980-х гг. расширяются системы коммунального хозяйства: увеличивается протяженность водопроводных и канализационных сетей, строятся новые очистные сооружения, вводятся в эксплуатацию котельные (ТЭЦ-5, котельная на Левобережье).

В Омске, как и в других городах Сибири, была необходимость развития пешеходных и транспортных инфраструктур. В период с 1971 по 1973 г. было построено 83 км асфальтированных дорог, 187 км тротуара и 40 км ливневой канализации и водостоков, были реконструированы крупные городские артерии – ул. Красный Путь, Нефтезаводская, Энтузиастов и проспект К. Маркса. К началу 1980-х гг. было обустроено девять подземных переходов (на пересечении пр. К. Маркса и ул. Лермонтова, ул. Интернациональная – Герцена, Б. Хмельницкого). При этом, несмотря на активный рост благоустройства города, только 59 % дорог имели твердое покрытие, из которых 24 % обустроены

ливневой канализацией. В связи с этим неблагоустроенные территории в весенний и осенний периоды были практически недоступны [20].

Будучи крупным промышленным городом, Омск имел экологически неблагоприятную среду. Воздушный и водный бассейны были нарушены за счет выбросов (выхлопов) различных газов.

Этап 1990-х гг. Нестабильность государственной системы в период 1990-х гг. не могло не отразиться на планировочном развитии города. Однако, несмотря на низкое финансирование проектов, продолжалась работа над проектированием городских территорий – застройки ул. М. Жукова, Фрунзе, п. Азово. В данный период также начинаются работы по восстановлению исторической части центра г. Омска.

Начало XXI в. В начале XXI в. стабилизируется экономическое положение в стране и начинается активный рост проектов благоустройства и их реализация: реконструированы ключевые магистрали города (проспект К. Маркса и ул. Ленина), обновлено покрытие в парках и установлены малые архитектурные формы (парк 30-летия Победы, сквер им. Дзержинского), построены новые транспортные развязки (пересечение ул. Масленникова и 10 лет Октября) (рис. 3). К Универсиаде 2017 г. благоустроена набережная р. Иртыш, возведены крупные спортивные объекты (ледовый дворец «Арена-Омск» и стадион «Красная Звезда»).

В настоящее время г. Омск – крупный транспортный узел, соединяющий воздушные, водные, железнодорожные, автомобильные и трубопроводные пути, промышленный, научный и культурный центр Западной Сибири. За счет участия в федеральных проектах в последние годы ведутся активные работы по благоустройству и озеленению не только центральной части города, но и периферийных зон.

Анализ и сравнение развития инженерного благоустройства в рамках рассматриваемой группы городов допустимо проводить исходя из пяти параметров: наличие мощения, качество и количество озеленения в границах городских территорий, развитость инженерных систем, наличие освещения и малых архитектурных форм (таблица). При этом малые архитектурные формы необходимо рассматривать двух видов: утилитарные – элементы городской среды, несущие практическую пользу, и визуальные – художественно-декоративные элементы. Направления развития городов представлены на рис. 4.

Анализ развития инженерного благоустройства рассматриваемой группы городов

Engineering services and equipment in the cities

Наименование параметра	г. Бийск (Алтайский край)	г. Томск (Томская область)	г. Омск (Омская область)
Мощение	В начале XX в. покрытие дорог и тротуаров присутствовало фрагментарно, активное развитие началось с 1950-х гг., массовое асфальтирование – с 1970-х гг.	Начало XX в. характеризуется отсутствием системного городского мощения, фрагментарное покрытие присутствовало в центральной части города, массовое асфальтирование тротуаров и дорог началось в 1960-х гг.	С 1930-х гг. – формирование системы покрытий тротуаров и дорог. Работы по замощению улиц приобретают массовый характер к 1950-м гг. К концу 80-х гг. XX в. увеличивается количество замощенных улиц (до 59 %)

Окончание таблицы
End of table

Наименование параметра	г. Бийск (Алтайский край)	г. Томск (Томская область)	г. Омск (Омская область)
Озеленение	С 1950-х гг. формируются фрагментарные парки и скверы, активное озеленение начинается с 2000-х гг.	С 1930-х гг. – озеленение центральной части города, создание парков (Городской сад, Лагерный сад)	С 1930-х гг. – массовое озеленение, реализация концепции «город-сад»
Ливневая канализация	С 1970-х гг. – фрагментарное строительство сети ливневой канализации, преимущественно состоящей из открытых дренажных канав	С 1960-х гг. – строительство ливневой канализации закрытого и открытого типа, с 2000-х гг. – попытки модернизации системы	С 1960-х гг. – фрагментарное строительство сети ливневой канализации, с 1980-х гг. – активное развитие
Системы жизнеобеспечения (водоснабжение, хозяйственно-бытовая канализация, тепло-снабжение)	С 1950-х гг. – развитие систем жизнеобеспечения, начало XXI в. – реконструкция и модернизация систем	С 1930-х гг. – развитие систем жизнеобеспечения, начало XXI в. – реконструкция и модернизация систем	С 1930-х гг. – развитие систем жизнеобеспечения, начало XXI в. – реконструкция и модернизация систем
Освещение	Начало XX в. – установка мачт освещения на центральных улицах, с 1950-х гг. – электрификация периферийных территорий города	Начало XX в. – электрификация центральной части города, с 1940-х гг. – активное развитие системы уличного освещения	С 1930-х гг. – установка уличных фонарей в центральной части города, с середины XX в. – электрификация периферийных территорий
Утилитарные малые архитектурные формы	Начало XX в. – установка скамей из дерева и металла, использование универсальных конструкций, конец XX – начало XXI в. – увеличение утилитарных МАФов	Начало XX в. – фрагментарная установка универсальных МАФов преимущественно в центральной части города, начало XXI в. – увеличение количества МАФов	Начало XX в. – установка МАФов в центральной части города, начало XXI в. – увеличение разнообразия и количества МАФов в границах города
Визуальные малые архитектурные формы	Середина XX в. – установка декоративных элементов среды преимущественно в городских парках, появление первых памятников	Начало XX в. – установка декоративных элементов среды в центральной части города и городских парках/скверах, начало XXI в. – масштабная установка визуальных МАФов	Аналогично г. Томску

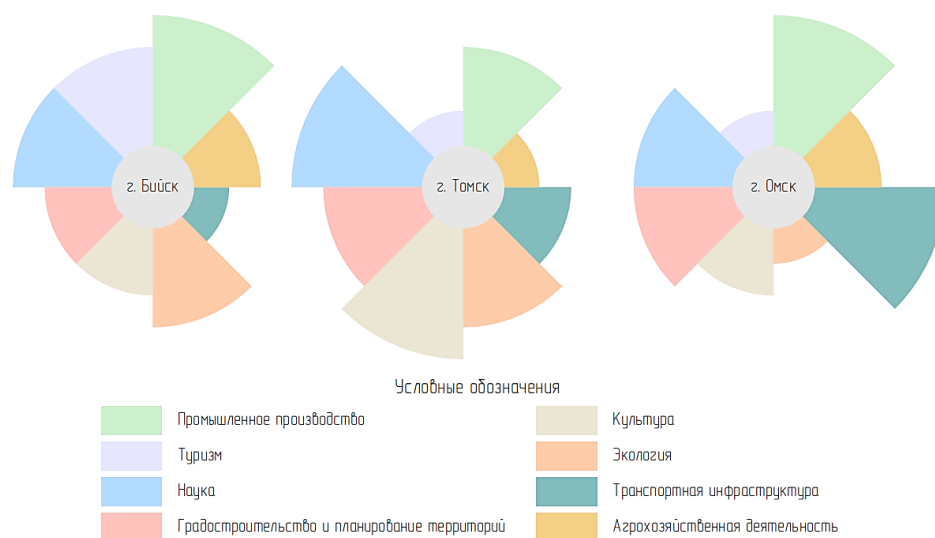


Рис. 4. Направления развития рассматриваемой группы городов

Fig. 4. Directions of the urban development

Заключение

Исходя из приведенной выше таблицы и анализа историко-хронологических событий в период XX–XXI вв. были получены некоторые результаты.

1. Бийск в процессе развития стал важным промышленным центром Алтайского края. После окончания Великой Отечественной войны на базе города развивалась химическая и легкая промышленность, однако с переходом на рыночную экономику количество градообразующих предприятий значительно уменьшилось. Имея выгодное территориальное расположение и непосредственную близость к Горному Алтаю, г. Бийск является важной транзитной точкой, связывающей территории Омской, Томской, Кемеровской и Новосибирской областей с Республикой Алтай. На качество и развитие инженерного благоустройства в границах города повлияли не только экономические, но и экологические и социальные аспекты. В период XX–XXI гг. из относительно небольшого уездного города Бийск превратился в значимый научный, туристический центр Алтайского края с сохранившейся исторической частью городской среды.

2. К началу XX в. г. Томск значительно отставал в развитии инфраструктуры от соседних городов. Являясь в настоящее время крупным инновационно-образовательным центром, он в процессе развития во многом имел сходство с промышленными городами, в период Великой Отечественной войны город стал базой для эвакуации большого количества предприятий из центральной части России. Несмотря на высокий рост промышленного производства в советский период, в середине XX в. преобладающим направлением развития стал объединенный научный кластер, состоящий из Томского государственного университета (ТГУ), Томского политехнического университета (ТПУ) и Томского государственного университета систем управления и радиоэлектрики

(ТУСУР). Как и в других городах Сибири, развитие и расширение благоустройства в границах городских территорий шло достаточно медленно, однако в условиях стремительных темпов развития промышленности и науки финансирование проекта по благоустройству в г. Томске было значительно выше, чем в двух других рассматриваемых городах.

3. Несмотря на сложные природные условия, г. Омск в начале XX в. был ориентирован на концепцию «город-сад». В период своего развития он прошел путь от небольшого города с неразвитой инфраструктурой до крупного промышленного и транспортного центра. В рассматриваемый период г. Омск стал одним из крупнейших индустриальных центров Сибири, что непосредственно повлияло на рост городского населения, но привело к ухудшению экосистемы воздушного и водного бассейнов. В условиях развития города как транспортного центра большое внимание уделялось строительству дорог, тротуаров и системам пересадочных узлов.

Необходимо также отметить, что каждый город из рассматриваемой группы имеет общие черты развития инженерного благоустройства и одинаковые этапы формирования.

1. Довоенный период (начало XX в.). Минимальное развитие благоустройства, отсутствие покрытия на пешеходных и транспортных коммуникациях, недостаточное количество озеленения в границах городских территорий, начало развития инженерной инфраструктуры (электрификация, водоснабжение, водоотведение, теплоснабжение).

2. 1950–60-е гг. В период индустриализации начинается активный рост промышленного производства, что непосредственно приводит к ухудшению экологии, но повышает городской бюджет и, соответственно, финансирование городских проектов.

3. 1960–80-е гг. Активный рост транспортной инфраструктуры, формирование сети трамвайных линий, проведение мероприятий, направленных на восстановление водного и воздушного бассейнов, развитие инженерной инфраструктуры.

4. 1990-е гг. Период стагнации и сокращения финансирования городских проектов. Ухудшение состояния городских территорий, попытки сохранения историко-архитектурной среды.

5. Начало XXI в. Период характерен формированием системного подхода к благоустройству территорий. Гибкость экономического планирования привела к стабилизации городского бюджета, что неотъемлемо повлияло на модернизацию и развитие коммунальной и транспортной инфраструктуры. Участие в национальных проектах, которые проводятся на территории РФ, позволяет в настоящее время фрагментарно реконструировать и совершенствовать городские территории.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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

2. Козюк М.Н., Чикильдина А.Ю. Благоустройство: история, культура, экология, право. Волгоград : Изд-во Волгоградского института управления – филиала РАНХиГС, 2019. 218 с.
3. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Советский период становления нормативных и правовых основ проектирования зданий и сооружений // Вестник ВСГУТУ. 2016. № 2 (59). С. 36–40. EDN: VVMXUH
4. Ефименко С.В., Бадина М.В. Учет особенностей природно-климатических условий при дорожно-климатическом районировании территории Западной Сибири // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (49). С. 204–213. EDN: TOLVBN
5. Гончаров Ю.М., Литягина А.В. Очерки истории города Бийска (вторая половина XIX – начало XX в.): Посвящается 300-летию города. Барнаул : Алтайский государственный университет, 2009. 276 с. ISBN 978-5-93957-330-6. EDN: SYAMBJ
6. Солотов В., Молодцова И. Бийск: от центра до окраин. Часть I // Деловой Бийск : Бийский городской портал. 2020. URL: <https://delovoibysk.ru/news/lik/bijsk-ot-centra-do-okrain-chast-i?ysclid=m7mw43zbfk877768952> (дата обращения: 28.01.2025).
7. Атапин И.И., Богданова О.В. Архитектура Бийска первой трети XX века: основные тенденции и локальные особенности // Изобразительное искусство Урала, Сибири и Дальнего Востока. 2021. № 4. С. 36–43. EDN: VMRMJE
8. Мельникова Е. Да будет свет: энергия первых бийских электростанций // Бийский рабочий. 2019. URL: <https://biwork.ru/news/da-budet-svet-energia-pervyh-bijskih-elektrostantsij> (дата обращения: 28.01.2025).
9. Солотов В., Молодцова И. Бийск: от центра до окраин. Часть II // Деловой Бийск : Бийский городской портал. 2020. URL: <https://delovoibysk.ru/news/lik/bijsk-ot-centra-do-okrain-chast-ii> (дата обращения: 28.01.2025).
10. Бартышева С.А., Орлов В.В., Занина Н.И., Цапко А.И., Умрихина В.Е., Емельянова Л.В., Масленникова Н.В., Соловьева С.А. Улицы Бийска. Бийск, 2016. 164 с.
11. Мосякин Д.С., Крицкий И.В. Плюсы и минусы строительства XX века // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 43–47. EDN: НТОУИ
12. Дмитриенко Н.М. История Томска. Томск : Изд-во Томского государственного университета, 2016. 206 с.
13. История Сибири. Том 5. Сибирь в период завершения строительства социализма и перехода к коммунизму. Санкт-Петербург : Наука, 1969. 464 с.
14. Едакина Д.А. Советская градостроительная политика и ее влияние на развитие Томска во второй трети XX в. // Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение. 2020. № 38. С. 230–237. DOI: 10.17223/22220836/38/21. EDN: PBAGDE
15. Воронина О.С. История градостроительного развития города Томска в XVII–XX вв. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (54). С. 91–106. EDN: VLONOV
16. Рыженко В.Г., Назимова В.Ш., Алисов Д.А. Пространство советского города (1920-е – 1950-е гг.): теоретические представления, региональные социокультурные и историко-культурологические характеристики (на материалах Западной Сибири). Омск : Наука, 2004. 292 с. EDN: TNDXXI
17. Оглы Б.И. Строительство городов Сибири. Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1980. 272 с.
18. Горелова Ю.Р. Облик советского Омска 1930-х гг.: архитектурные реалии и культурный контекст // Архитектура и дизайн. 2017. № 3. С. 39–50. EDN: XOYCRF
19. Сизов С.Г. Озеленение Омска в годы «оттепели» // Проза.ру : российский литературный журнал. 2013. URL: <https://proza.ru/2013/03/13/1185> (дата обращения: 22.02.2025).
20. Энциклопедия города Омска. В 3 томах. Том 1. От прошлого к настоящему / под ред. Г.А. Павлова. Омск : ЛЕО, 2009. 249 с. ISBN 978-5-87821-152-9.

REFERENCES

1. Karelin D.V., Tyryshkina M.S. Evolution of Engineering Improvement of Urban Streets in the Siberian Region in the 17th and Early 20th Centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo*

- arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – *Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (1): 118–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-118-131. EDN: JPZHPP (In Russian)
2. Kozyuk, M.N., Chikildina A.Y. Landscaping: History, Culture, Ecology, Law. Volgograd, 2019. 218 p. (In Russian)
3. Kravchuk V.A., Kravchuk E.V. Soviet Period of Formation of Normative and Legal Foundations of Building Design. *Vestnik VSGUTU*. 2016; 2 (59): 36–40. EDN: VVMXUH (In Russian)
4. Efimenko S.V., Badina M.V. Road-Building Climatic Zoning in West Siberia. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; 2(49): 204–213. EDN: TOLVBN (In Russian)
5. Goncharov Y.M. Essays on the Biysk History in the 19th and Early 20th Centuries. Barnaul: *Altai State University*. 2009. 276 p. ISBN 978-5-93957-330-6. EDN: SYAMBJ (In Russian)
6. Sololov V.I. Molodtsova Biysk: From the center to outskirts. Part I. Available: <https://delovoi-biysk.ru/news/lik/biysk-ot-centra-do-okrain-chast-i?ysclid=m7mw43zbfk877768952> (accessed January 1, 2025). (In Russian)
7. Atapin I.I., Bogdanova O.V. Architecture of Biysk in the 20th Century: Main Local Trends. *Izobrazitel'noe iskusstvo Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2021; (4): 36–43. EDN: VMRMJE (In Russian)
8. Melnikova E. Let there be Light: The Energy of the First Biysk Power Plants. *Biiskii rabochii*. 2019. Available: <https://biwork.ru/news/da-budet-svet-energiya-pervyh-biyskih-elektrostantsij> (accessed January 1, 2025). (In Russian)
9. Sololov V., Molodtsova I. Biysk: From the center to outskirts. Part II. Available: <https://delovoi-biysk.ru/news/lik/biysk-ot-centra-do-okrain-chast-ii> (accessed January 1, 2025). (In Russian)
10. Bartysheva S.A., Orlov V.V., Zanina N.I., et al. Streets of Biysk. Biysk, 2016. 164 p. (In Russian)
11. Mosyakin D.S., Kritsky I.V. Pros and Cons of 20th Century Construction. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2021; 22 (74): 43–47. EDN: HTOUJI (In Russian)
12. Dmitrienko N.M. History of Tomsk. Tomsk: TSU, 2016. 206 p. (In Russian)
13. Okladnikov A.P., et al. (Eds.). History of Siberia. Vol. 5. Siberia during the completion of the construction of socialism and the transition to communism. Saint-Petersburg: Nauka, 1969. 464 p. (In Russian)
14. Edakina D.A. Soviet Urban Planning Policy and its Impact on the Development of Tomsk in the 20th Century. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Kul'turologiya i iskusstvovedenie*. 2020; (38): 230–237. DOI: 10.17223/22220836/38/21. EDN: PBAGDE (In Russian)
15. Voronina O.S. History of Architectural Urban Development of Tomsk in the 17–20th Centuries. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; 1 (54): 91–106. EDN: VLONOB (In Russian)
16. Ryzhenko V.G., Nazimova V.Sh., Alisov D.A. The Soviet City (1920–1950s): Theoretical Concepts, Regional Socio- and Historical-Cultural Characteristics. Omsk: Nauka, 2004. 292 p. EDN: TNDXXI (In Russian)
17. Ogly B.I. Construction of Siberian Cities. Leningrad: Stroyizdat, 1980. 272 p. (In Russian)
18. Gorelova Y.R. The Soviet Omsk in the 1930s: Architecture and Culture. *Arkhitektura i dizain*. 2017; (3): 39–50. EDN: XOYCRF (In Russian)
19. Sizov S.G. Landscaping Omsk in the Years of the Thaw. Proza.ru. 2013. Available: <https://proza.ru/2013/03/13/1185> (accessed February 22, 2025). (In Russian)
20. Pavlov G.A. (Ed.). Encyclopedia of the Omsk city, in 3 vol. Vol. 1. From the Past to the Present. Omsk: LEO, 2009. 249 p. ISBN 978-5-87821-152-9. (In Russian)

Сведения об авторах

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

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

Authors Details

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

Mariya S. Tyryshkina, Graduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, ma.tyryshkina@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 13.05.2025
Одобрена после рецензирования 07.10.2025
Принята к публикации 09.10.2025

Submitted for publication 13.05.2025
Approved after review 07.10.2025
Accepted for publication 09.10.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 120–133.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 120–133.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-120-133

EDN: KVHBZE

АРХИТЕКТУРА КИНОЛАБОРАТОРИИ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Евгений Сергеевич Пономарев, Ия Петровна Спиридонова

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Архитектура пространства киностудий в условиях Крайнего Севера представляет собой новое явление в отечественном кинематографе, требующее учета экстремальных климатических условий вечной мерзлоты и логистических ограничений, специфики кинопроизводства. Исследование направлено на разработку оптимальных архитектурно-планировочных решений, обеспечивающих эффективное кинопроизводство в суровых северных условиях.

Цель: разработать принципы архитектурной организации кинолаборатории на Крайнем Севере, обеспечивающие высокую эффективность кинопроизводства и оптимальную адаптацию к специфическим климатическим и экологическим условиям региона.

Методы. В рамках данного исследования использовались методы сравнительного анализа разного вида, обобщения и структурирования информации, моделирования.

Научная новизна настоящего исследования заключается в комплексном подходе к разработке архитектурно-планировочных решений киностудий для Крайнего Севера с учетом уникальных климатических и технологических условий региона.

Результаты. Определены ключевые критерии проектирования, такие как зонирование, модульные конструкции и энергосберегающие технологии. Результаты применимы для строительства кинокомплексов в арктических регионах.

Ключевые слова: кинематография, кинокомплекс, архитектурная организация, киностудия

Для цитирования: Пономарев Е.С., Спиридонова И.П. Архитектура кинолаборатории в условиях Крайнего Севера // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 120–133. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-120-133. EDN: KVHBZE

ORIGINAL ARTICLE

ARCHITECTURE OF MOTION PICTURE LABORATORIES IN THE FAR NORTH

Evgeny S. Ponomarev, Iya P. Spiridonova

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Tatarstan, Russia

Abstract. The architecture of motion picture laboratories in the Arctic is a new phenomenon in domestic cinema, requiring consideration of extreme climatic conditions, permafrost, logistics

constraints, and specifics of the film production. Yakut cinema features many genres, including drama, horror—especially folk horror—comedies, documentaries, and popular science films. The cinema predominantly showcases social and psychological dramas, as well as mystical works that reflect the unique traits of the national culture.

Purpose: This study aims to develop optimal architectural and planning solutions that ensure efficient film production in harsh northern conditions.

Methodology: The following methods are used to develop the architecture of motion picture laboratories: comparative analysis, generalization and structuring of information, and modeling.

Research findings: Key design criteria have been identified, such as zoning, modular construction, and energy-saving technologies. The results are applicable for building film complexes in Arctic regions.

Value: This study proposes a comprehensive approach to developing architectural and planning solutions for motion picture laboratories in the Arctic, taking into account its unique climatic and technological conditions.

Keywords: cinematography, film complex, architectural organization, motion picture laboratory

For citation: Ponomarev E.S., Spiridonova I.P. Architecture of Motion Picture Laboratories in the Far North. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 120–133. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-120-133. EDN: KVHBZE

Архитектурное пространство кинолаборатории в условиях Крайнего Севера представляет собой сложную и многогранную проектную задачу, которая требует не только применения современных технологий и инновационных решений, но и глубокого учета уникальных природных, климатологических и культурных особенностей региона. Северные территории России, в первую очередь Республика Саха (Якутия), характеризуются экстремальными климатическими условиями, включающими суровые зимы с температурой, опускающейся до -50°C и ниже, сильные ветры, а также значительные сезонные перепады температуры – от таких морозов до коротких летних периодов с максимумами до $+30^{\circ}\text{C}$ [1]. Эти климатические особенности задают специальные требования к конструктивным и инженерным решениям, а также к инновационным технологиям, используемым при проектировании и строительстве объектов.

Одной из основных задач является создание комфортных и безопасных условий для работы и возможного проживания персонала кинолаборатории в условиях длительной полярной ночи, которая может продолжаться до двух месяцев в северных районах. В данной ситуации ключевое значение приобретает создание эффективного искусственного освещения, максимально приближенного к естественному дневному свету. Не менее важно обустроить рабочее пространство так, чтобы оно способствовало как психологическому, так и физическому благополучию сотрудников. Для этого активно используются биодинамические LED-системы, имитирующие суточный цикл освещения. Кроме того, применяются решения вроде световых колодцев и зимних садов, которые не только украшают интерьер, но и служат важными зонами психологической разгрузки в темное время года [2].

Вопросы энергоэффективности и рационального использования ресурсов, а также производительность кинолаборатории становятся особенно актуальными. В условиях ограниченного доступа к традиционным источникам энергии

проектирование должно включать систему замкнутого цикла жизнеобеспечения, которая предполагает повторное использование тепловой энергии и применение возобновляемых источников. Одной из ключевых задач является снижение тепловых потерь с помощью теплоизоляционных материалов, специальных архитектурных решений и методов строительства, адаптированных к вечномёрзлым грунтам. Для этого используются свайные фундаменты с термостабилизаторами и вентиляционные подполья, которые помогают избежать воздействия сезонных пучений и обеспечивают стабильность конструкций в условиях оттаивания и замёрзания грунтов [3]. Важным аспектом является предотвращение деформаций оснований и фундаментов, обусловленных неравномерным оттаиванием вечномёрзлого слоя, а также применение гибких инженерных коммуникаций и амортизирующих элементов, компенсирующих сезонные подвижки грунта.

Помимо технических аспектов, необходимо учитывать культурные и социальные особенности региона. Местные традиции, символика и специфика культурного наследия интегрированы в архитектурные решения для формирования аутентичной и гармоничной среды. Важной задачей является создание архитектурной среды, отражающей идейность региона и способствующей развитию межкультурного диалога, а также объединяющей культурные доминирующие идеи с современными технологиями.

Проектирование кинолаборатории предполагает также высокий уровень экологической ответственности: минимизацию воздействия на окружающую среду, эффективное управление отходами, внедрение технологий «зеленого» строительства и использование возобновляемых ресурсов. В условиях хрупкой северной природы, отличающейся неповторимым растительным и животным миром, особенно критично применять принципы экологической устойчивости. Это также необходимо для соответствия глобальным требованиям экологической добросовестности.

Архитектурный и инженерный дизайн кинолаборатории в условиях Крайнего Севера должен стать интегрированным, инновационным и устойчивым решением, способным обеспечить долгосрочную эксплуатацию при экстремальных природных условиях, а также создавать комфортное и функциональное пространство для сотрудников и специалистов кинолаборатории. Это требует детального изучения особенностей региона и применения междисциплинарных подходов, сочетающих современную архитектурную практику, инженерные инновации и культурно-социальные особенности.

Якутск как административный центр Республики Саха (Якутия) представляет собой крупный город на северо-востоке России, чье расположение на берегу р. Лены определяет его особую роль. Этот город – один из крупнейших в мире населенных пунктов, построенных на вечной мерзлоте; его природные и климатические характеристики уникальны благодаря географическому положению.

Расположенный на широте около 62° с. ш., город входит в число самых северных населенных пунктов мира с населением свыше 300 тыс. чел. Его климат отличается суровыми зимами: средняя температура в январе колеблется от –40 до –50 °С, а в пик морозов может опускаться ниже –60 °С. Лето же приносит короткий, но заметно более теплый период, когда столбик термометра может достигать +30 °С и выше.

В Якутске и в регионе в целом зимний период характеризуется сокращением светового дня до минимума. В течение полярной ночи солнце не поднимается над горизонтом – это продолжается до марта-апреля и занимает от полутора до двух месяцев. Летний световой день может превышать 20 ч. Эти природные явления накладывают значительный отпечаток на жизнь населения и требуют особых инженерных и архитектурных решений при строительстве и планировке городской среды.

Особенность вечномёрзлого грунта – его сезонное пучение и оседание, вызванные температурными колебаниями, что требует учета при проектировании. В летний период, когда верхний слой грунта оттаивает, происходит его пучение, а в зимнее время грунт замерзает и сжимается. Эти циклы приводят к деформациям зданий, что особенно важно учитывать при долгосрочной эксплуатации [4].

Якутск – центр культурной и национальной жизни коренного народа – якутов, а также многонационального сообщества. Город славится богатым культурным наследием, уникальными традициями, включая зимние праздники, фольклор, ремесла и кулинарию. Эти особенности отражаются и в архитектуре, которая сочетает советскую классическую застройку, современные жилые комплексы и этнические элементы.

Местоположение кинолаборатории в г. Якутске оправдано как стратегически выгодное решение, обеспечивающее инфраструктурную поддержку, транспортную доступность и взаимодействие с региональными киноиндустриями и культурными центрами. Такой подход также способствует развитию региона, стимулируя рост профессиональных ресурсов, привлекая инвесторов, а также содействуя популяризации местного кинематографа на национальном и международном уровнях.

Пространственная архитектурная адаптация для киностудий в условиях Крайнего Севера требует иного подхода к проектированию, чем в умеренных широтах [5]. Основой энергоэффективности становится плотная тепловая оболочка здания, где особое внимание уделяется не только выбору современных теплоизоляционных материалов, но и тщательной проработке всех узлов примыканий. Критически важным становится устранение любых мостиков холода через применение специальных терморазрывных конструкций и многослойных систем соединений.

При проектировании зданий с элементами, пропускающими свет, учитываются климатические условия. Фотохромные стекла, световоды с зеркальными системами и подвижные светоотражающие панели позволяют эффективно использовать ограниченный солнечный свет зимой и предотвращать перегрев летом. Такое многоуровневое остекление фасадов в сочетании с регулируемыми солнцезащитными устройствами формирует динамичную световую среду, которые подстраиваются под потребности.

Купольные и округлые архитектурные формы доказали свою эффективность в северных широтах. Их аэродинамические характеристики обеспечивают значительное снижение ветровой нагрузки (до 40 %) по сравнению с традиционными прямоугольными зданиями. Плавные линии конструкций способствуют естественному соскальзыванию снежных масс, предотвращая опасное накопление осадков на кровле.

Современные строительные технологии предлагают несколько вариантов купольных решений, каждый из которых имеет свои преимущества. Геодезические купола, разработанные по принципам Фуллера, используют сеть треугольных ячеек из композитных материалов, позволяя создавать огромные пролеты до 150 м без внутренних опор. Эти конструкции отличаются исключительной акустикой, что особенно ценно для звукозаписывающих студий. Альтернативой выступают монолитные бетонные оболочки с интегрированными системами подогрева и специальной фактурной обработкой поверхностей. Для мобильных нужд кинопроизводства разработаны пневмокаркасные структуры – надувные купола с двойной мембраной [6]. Эти конструкции обеспечивают быструю и эффективную установку, а также последующий демонтаж, что значительно повышает мобильность и гибкость в процессе съемок. А надувные купола можно также временно использовать в зимний сезон на территории кинолаборатории в качестве киносъемочного павильона.

Такие мобильные транспортируемые купола могут подойти для выездных съемок. Надувные купола подходят для быстрого, временного или сезонного использования в северных регионах, когда важно быстро развернуть защиту от непогоды и обеспечить минимальный комфорт (табл. 1).

Таблица 1

Надувные купола

Table 1

Pneumatic domes

Плюсы	Минусы
1. Быстрая установка: купол можно развернуть и надуть за несколько часов, что важно в условиях короткого строительного сезона 2. Легкость и мобильность: конструкция легкая, ее можно транспортировать и перемещать на новое место при необходимости 3. Достаточная теплоизоляция: современные материалы позволяют обеспечить хорошую теплоизоляцию, что важно для северных холодов 4. Устойчивость к ветру и снеговой нагрузке: купола имеют аэродинамичную форму, что снижает нагрузку от ветра и предотвращает накопление снега 5. Экономия затрат: меньше затрат на строительные материалы и трудозатраты по сравнению с капитальными зданиями 6. Герметичность и защита от влаги: современные мембраны хорошо защищают от проникновения влаги и ветра	1. Ограниченный срок эксплуатации: надувные конструкции обычно служат не более 5–15 лет, в зависимости от эксплуатации и ухода 2. Чувствительность к повреждениям: проколы и разрывы ухудшают эксплуатационные характеристики и требуют быстрого ремонта 3. Ограничения по внутреннему пространству: купол имеет ограниченный внутренний объем без дополнительных опор, что может сужать свободное пространство 4. Потенциальные проблемы с вентиляцией и конденсацией: требуется хорошая система вентиляции, иначе возможно образование конденсата и плесени 5. Высокие требования к материалам: для эксплуатации в экстремально холодных условиях нужны дорогие и высококачественные материалы

Модульные строительные системы становятся все более востребованными, особенно когда сроки строительства ограничены, а пространство требует частых изменений. Они идеально подходят для возведения домов и других объектов в северных регионах. Каждый модуль представляет собой готовый, стандартизированный блок, содержащий необходимые функциональные элементы здания. Геодезические купола, построенные по модульному принципу, отличаются прочностью и скоростью монтажа благодаря своей каркасной структуре из треугольных сегментов, равномерно распределяющих нагрузку.

Для киностудий модульность особенно актуальна, поскольку такие объекты требуют высокой гибкости пространства, оперативной перестройки и адаптации под различные сценарии производства. Модуль позволяет быстро изменять конфигурацию помещений – добавлять или удалять блоки, трансформировать внутренние зоны с помощью подвижных перегородок. Это существенно сокращает сроки строительства и снижает затраты на реконфигурацию по сравнению с традиционными капитальными зданиями.

Главные характеристики модулей для киностудий:

- стандартизированные размеры и соединения, обеспечивающие легкую сборку и возможность масштабирования комплекса;
- многослойные сэндвич-панели с высокой тепло- и звукоизоляцией, что важно для поддержания комфортного микроклимата и акустики в съемочных павильонах;
- встроенные инженерные коммуникации (вентиляция, электроснабжение, освещение), оптимизированные под нужды киноиндустрии;
- узлы соединения модулей, которые обеспечивают термическую непрерывность конструкции, допускают температурные деформации без повреждений и сохраняют звукоизоляционные свойства между помещениями;
- мобильность и адаптивность, позволяющие быстро менять планировку в зависимости от специфики съемочного процесса.

Таким образом, модульность в строительстве киностудий не только ускоряет возведение объектов, но и создает гибкую платформу для эффективного использования пространства, что особенно важно в условиях сложного климата и частой смены производственных задач.

В условиях Крайнего Севера вопросы энергообеспечения приобретают особую актуальность, требуя комплексного подхода, сочетающего традиционные и альтернативные источники энергии. Энергетическая концепция современной киностудии в арктическом регионе основывается на принципах максимальной автономности, возобновляемости и экологической безопасности [7]. В таких условиях энергообеспечение киностудии может быть организовано с помощью традиционных и альтернативных источников энергии.

1. Традиционные источники.

Дизельные генераторы – резервный или основной источник в периоды низкой выработки возобновляемой энергии. Природный газ – если есть доступ к газовой инфраструктуре, может использоваться в микротурбинах или когенерационных установках.

2. Возобновляемые источники энергии [8].

Солнечные панели (с учетом полярного дня) – в летний период могут давать значительное количество энергии. Ветрогенераторы – арктические регионы часто обладают сильными ветрами, что делает ветроэнергетику перспективной.

3. Системы накопления и управления энергией.

Аккумуляторные батареи – для хранения избыточной энергии. Умные энергосети (Smart Grid) – оптимизация распределения энергии между источниками и потребителями.

4. Энергоэффективные технологии.

Тепловые насосы – для отопления помещений с использованием низкопотенциального тепла. Рекуперация тепла – использование тепла от оборудования для обогрева. Пассивный дом (утепление, энергосберегающие материалы) – снижение теплопотерь здания. Согласно нормативам, в условиях Крайнего Севера для обогрева объектов социально-культурной сферы применяют две взаимодополняющие системы – приточно-вытяжную вентиляцию и внутреннее отопление, что в совокупности обеспечивает необходимый тепловой баланс [9].

Матричный анализ архитектурно-планировочных решений ведущих мировых киностудий проводился по 7 параметрам (табл. 2). Данные параметры оценивались по 100-балльной шкале с уровнями соответствия (рис. 1).

Таблица 2

Матрица сравнения отечественных и зарубежных киностудий

Table 2

Comparison of Russian and foreign motion picture laboratories

Название объекта исследования	Генплан (балл)	Планы (балл)	Разрезы (балл)	Фасады (балл)	Форма (балл)	Интерьер (балл)	Местоположение (балл)	Среднее
Киностудия имени М. Горького	75	50	0	25	60	50	50	44,29
Ленфильм	80	50	0	40	60	0	65	42,14
Амедиа	20	80	0	60	65	70	50	49,29
Главкино	65	20	0	75	85	75	50	52,86
Мосфильм	85	75	0	85	85	55	50	62,14
Paramount	70	0	0	45	80	55	65	45,00
Warner Bros	65	0	0	45	70	0	45	32,14
Universal pictures	80	85	0	25	70	0	45	43,57
20th century studios	70	50	0	60	70	50	50	50,00
Sony pictures	70	50	10	40	85	50	50	50,71
China Film Group Corporation	70	0	0	50	85	65	0	38,57
Lionsgate studios	65	60	0	70	45	55	60	50,71
Amazon MGM studios	50	50	0	60	20	45	45	38,57

Окончание табл. 2

End of table 2

Название объекта исследования	Генплан (балл)	Планы (балл)	Разрезы (балл)	Фасады (балл)	Форма (балл)	Интерьер (балл)	Местоположение (балл)	Среднее
Pinewood	70	0	0	50	60	45	65	41,43
Elstree Studios	60	30	0	50	50	50	50	41,43
Storyline Studios Norway	0	50	50	30	30	40	50	35,71
Park City Film Studios	60	50	0	20	20	70	40	37,14
Alvernia studios	70	0	0	0	70	30	30	28,57
Highline studios	0	20	0	0	0	60	0	11,43
Martini film studios	70	30	0	55	0	70	40	37,86
Three Mills studios	60	20	20	30	45	55	0	32,86
Лендок	0	0	0	0	0	35	50	14,17
Atlas Film Studios	0	15	0	15	0	10	30	10,00
Avalon studios	0	40	0	65	70	35	40	35,71
Barrandov Studios	65	35	0	45	65	70	75	50,71
Atlanta West Studios	60	40	0	10	20	30	30	27,14
WEPP Studios	50	20	0	0	10	50	30	26,67
Bridge studios	30	0	0	20	0	0	0	7,14
Cinelease Studios	30	40	0	20	20	30	20	22,86
Pyramids Studios	0	0	0	60	30	50	55	27,86

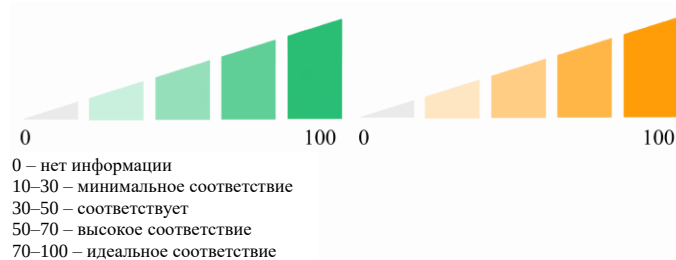


Рис. 1. Шкала 100-балльная

Fig. 1. 100-point scale

Анализировались генплан, планы этажей, разрезы – с точки зрения конфигурации и функционального зонирования киностудий. Фасады, формы и интерьеры оценивались по современным тенденциям и требованиям комфорта для работы на Крайнем Севере. Местоположение оценивалось по степени соответствия условиям размещения кинолаборатории. Развитие кинопроизводства в регионах России остается на низком уровне. Основная причина в том, что кинокомпании приезжают туда преимущественно ради подходящих локаций, вынужденно перевоза с собой всю съемочную инфраструктуру – технику, транспорт и персонал. Проблема усугубляется не только недостатком профессиональной базы для создания фильмов, но и слабой инфраструктурой. Отсутствие нужного количества мест для размещения и проживания большой съемочной группы заставляет продюсеров избегать отстающие регионы при планировании длительных и масштабных проектов [10].

Для сравнения: голливудские студии (Paramount, Warner Bros, Universal, 20th century studios, Sony pictures) используют инновационные подходы: кампусную планировку, зеленые технологии и модульные павильоны. Однако их недостатками являются высокое энергопотребление, слабая адаптация к холодному климату и большие земельные затраты (табл. 2).

Европейские киностудии предлагают комбинированные решения, энергоэффективные системы и гибкие пространства, но их ключевые минусы – неспособность к арктическим условиям и высокая стоимость строительства.

Киностудия имени М. Горького (Москва): в Москве климат умеренно-континентальный, но студия может быть адаптирована под более северные условия за счет усиленной изоляции и модернизации фасадов. Ленфильм (Санкт-Петербург): находится ближе к северу, в условиях влажного и прохладного климата; здесь традиционно используются кирпич и плотные материалы с укрепленными крышами и эффективным отоплением. Amedia и Главкино (Подмосковье и Москва): современные комплексы, где реализуются энергосберегающие технологии и системы «умный дом», что актуально для северных регионов. Мосфильм (Москва): большая территория с разнообразными павильонами и мастерскими, где применяются комплексные технические решения для комфортных условий зимой (табл. 2).

Ни одна из существующих моделей студийных комплексов не является универсальной, а региональное кинопроизводство в России требует развития инфраструктуры и адаптации современных решений с учетом климатических и экономических особенностей. Региональное кинопроизводство может стать точкой роста, объединяющей творческий потенциал, современные технологии и инвестиционные ресурсы, что в конечном итоге будет способствовать комплексному социально-экономическому развитию территорий в соответствии с принципами устойчивого развития [11].

Например, проведение в регионе постоянного международного кинофестиваля значительно повышает его привлекательность для кинематографистов [12]. Международные кинофестивали и культурные инициативы позиционируют Якутию как важный центр кинопроизводства, способствуя притоку туристов и инвестиций в регион. Проект демонстрирует, как современная инфраструктура может стать катализатором качественных изменений во всех сферах жизни северных территорий.

Экологическая составляющая системы включает постоянный мониторинг углеродного следа в реальном времени, технологии минимизации воздействия на окружающую среду и замкнутый цикл использования ресурсов. Особый акцент делается на вторичной переработке всех видов отходов и оптимизации жизненного цикла оборудования, что обеспечивает устойчивость всей энергетической инфраструктуры в долгосрочной перспективе. Такой комплексный подход позволяет не только снизить экологическую нагрузку, но и обеспечить устойчивое развитие всей энергетической инфраструктуры на долгосрочную перспективу, создавая баланс между экономической эффективностью и экологической ответственностью.

Современные технологии дают возможность сохранять нематериальное культурное наследие в цифровом виде. Технологии захвата движения (motion capture) точно передают мельчайшие детали народных танцев, а виртуальная реальность (VR) позволяет воссоздать утраченные ритуалы. Голографические архивы сохраняют образы последних носителей редких традиций, а нейросети помогают изучать глубинные смыслы эпических произведений.

Социальное пространство киностудии представляет собой сложный и динамичный организм культурного обмена, где тесно переплетаются традиции и современные технологии, создавая благоприятную среду для творчества и взаимодействия. Амфитеатры, специально спроектированные для проведения национальных праздников и церемоний, таких как «ысыах» – день летнего солнцестояния, играют важную роль в сохранении и возрождении культурных обычаев. В этих открытых пространствах собираются представители разных поколений, чтобы совместно отмечать ключевые моменты времени, укрепляя свою культурную идентичность и связи внутри сообщества.

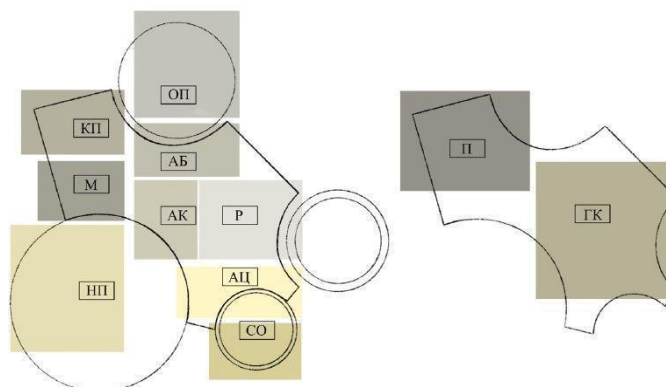
В то же время современные медиатеки, оснащенные передовыми технологиями, обеспечивают беспрепятственный доступ к обширным цифровым коллекциям фольклорного наследия. Это способствует не только надежному сохранению уникальных культурных артефактов, но и открывает горизонты для их нового осмысления и интеграции в современное искусство и медиа. Создатели и исследователи получают ценный ресурс для разработки инновационных проектов, способных расширить границы традиционного и наладить связь между прошлым и настоящим.

Экономическая модель комплекса основана на принципах устойчивого развития культурного производства. Мастерские по изготовлению аутентичного реквизита сочетаются с высокотехнологичными студиями, где создаются мультимедийные образовательные программы. Особое место занимает этнокультурный туризм, предлагающий погружение в традиционный уклад жизни.

Этот проект призван стать мостом между прошлым и будущим, используя современные строительные технологии для сохранения культурной самобытности. Каждый аспект комплекса, от цветовой палитры фасадов до звукового оформления помещений, должен быть тщательно спланирован, чтобы создать единое целое, объединяющее вековые традиции северных народов с новаторским подходом к культурному наследию. Киноиндустрия способна стать катализатором для будущего развития региона. Тщательное изучение местных ресурсов позволит не только оптимально разместить кинопроизвод-

ственные мощности, но и подстегнуть развитие смежных сфер: туризма, транспорта и образования.

На схеме киностудии для обеспечения эффективной производительности необходимы различные виды специализированных пространств, соответствующих основным этапам производства фильма. На данном этапе зоны предусмотрены без учета культурного кода в архитектуру, а также без интеграции геодезического и надувного купола. Такой подход позволит сосредоточиться на базовых технических требованиях, обеспечивающих удобство работы и оптимизацию производственных процессов (рис. 2).



Условные обозначения:

КП – комплекс постпроизводства	Р – развлекательный центр
ОП – общественное пространство	НП – натурные площадки
АБ – административный блок	АЦ – автотранспортный цех
М – мастерские	П – павильоны
АК – актерский комплекс	ГК – гостиничный комплекс
СО – склад оборудования	

Рис. 2. Функциональное зонирование

Fig. 2. Functional zoning

В рамках концепции в функциональном зонировании показаны два этажа, на которых располагаются примерные объемы пространств, необходимых для различной деятельности, такой как кинопроизводство и досуг (рис. 2). Также предусмотрены возможности для проведения образовательных программ, что позволяет не только заниматься творческой работой и отдыхать, но и развиваться, обучаясь новым навыкам и знаниям. Такой подход способствует гармоничному сочетанию работы, отдыха и обучения в едином пространстве. Натурные площадки, склад оборудования и общественное пространство представляют собой куполообразные конструкции.

В центральном главном объеме кинолаборатории «врезаны» купола. Для натурных площадок и общественного пространства планируется использовать надувные купола, что обеспечивает их мобильность и временность использования (рис. 3). В зимний сезон такие купола можно применять в качестве временных укрытий или площадок, а в летний – легко разобрать и перенести или изме-

нить их конфигурацию (рис. 4). В рамках концепции предусмотрен также геодезический купол для склада оборудования, что позволяет максимально эффективно использовать пространство и обеспечить надежность конструкции. Особое значение имеет возможность трансформации купола общественного пространства в летний сезон – он может стать местом для проведения локальных празднований, таких как «Ысыах» в честь летнего солнцестояния (рис. 2, 4).

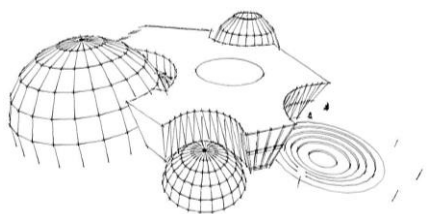


Рис. 3. Концепция формообразования кинолаборатории (зимний сезон)
Fig. 3. Concept of motion picture laboratory (winter)

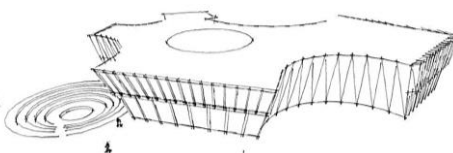


Рис. 4. Вид № 3 в летний сезон
Fig. 4. View No. 3 in summer

Рекомендации для условий Крайнего Севера включают пять ключевых принципов: модульность с использованием быстровозводимых конструкций, трансформируемых пространств и поэтапного расширения; энергонезависимость через гибридные энергосистемы, геотермальные источники и аккумуляцию тепла; климатическая адаптация с аэродинамическими формами, двойными тепловыми контурами; технологическая интеграция, включающая цифровые двойники павильонов; культурная специфика с этнографическими павильонами, центрами народных промыслов и интерактивными музеями.

Создание киностудии в условиях Крайнего Севера представляет собой уникальный синтез инновационных технологий, культурного наследия и устойчивого развития. Этот проект выходит далеко за рамки обычного кинопроизводственного комплекса, становясь важным социокультурным центром, который гармонично вписывается в суровую арктическую среду, одновременно сохраняя и развивая местные традиции.

Проект демонстрирует инновационный подход к строительству в суровых северных условиях. Он объединяет передовые технологии с традиционными якутскими культурными особенностями, уделяя особое внимание энергоэффективности и устойчивости к экстремальному климату. Применение местных материалов и возобновляемых источников энергии делает его примером экологически сознательного строительства на Крайнем Севере.

Особую ценность представляет интеграция кинолаборатории в местное сообщество через образовательные программы, создание рабочих мест и поддержку местных авторов. Развитие кинематографических навыков у жителей региона не только способствует профессиональному росту, но и становится мощным инструментом сохранения культурного наследия и языков коренных народов.

В перспективе киностудия может стать моделью для подобных проектов в других арктических регионах, показывая путь гармоничного сочетания тех-

нологического прогресса, культурной идентичности и бережного отношения к хрупкой северной природе. Это не просто производственный комплекс, а живой организм, который будет развиваться вместе с регионом, сохраняя его уникальность и открывая новые возможности для творчества и самореализации жителей Якутии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Беляева Е.Л.* Биоклиматическая комфортность и условия градостроительного развития, благоустройства и озеленения // *Academia. Архитектура и строительство*. 2024. № 1. С. 136–146. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-1-136-146
2. *Винницкий М.В.* Подходы к организации архитектурно-градостроительной среды в суровых условиях северных регионов // *Академический вестник УралНИИПроект РААСН*. 2023. № 3. С. 37–43. DOI: 10.25628/UNIP.2023.58.3.006
3. *Краснопольский Ф.К.* Архитектурно-планировочная структура арктических городов // *Наука, образование и экспериментальное проектирование*. 2020. № 1. С. 266–268. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10064
4. *Палкина О.Л.* Принципы планирования и проектирования в Арктике на основе динамической архитектуры // *Наука, образование и экспериментальное проектирование*. 2020. № 1. С. 263–266. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10063
5. *Галеев С.А.* Виды адаптации архитектурных систем к экстремальным условиям среды // *Системные технологии*. 2020. № 4 (37). С. 77–83.
6. *Афанасьева Е.А., Ли И.В.* Светопрозрачные мембраны в объемнопланировочной структуре общественных зданий // *Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика*. 2025. № 1 (5). С. 71–85.
7. *Корнилов Т.А., Алексеев Н.Н.* Архитектурно-конструктивные приемы в проектировании энергоэффективных арктических поселений // *Academia. Архитектура и строительство*. 2023. № 3. С. 54–63. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-54-63
8. *Селецкая К.В., Новиков С.В.* Принципы ресурсосбережения в архитектуре арктических поселений // *Известия КГАСУ*. 2018. № 1 (43). С. 79–86.
9. *Косарев Л.В., Вавилов В.И., Батрыняк Л.В.* Эксплуатация инженерных коммуникаций здания общественно-культурного назначения в условиях северных территорий в г. Нерюнгри Саха (Якутия) // *Экономика строительства*. 2022. № 10. С. 47–58.
10. *Косинова М.И., Горшкова А.А.* Кластерный подход в киноиндустрии // *Вестник университета*. 2022. № 11. С. 94–102. DOI: 10.26425/1816-4277-2022-11-94-102
11. *Ланина Л.А., Малышев А.В., Ромодановская Н.Б.* Анализ развития аудиовизуального кластера в регионах (на примере международного опыта) // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2020. Т. 13. № 6. С. 31–40. DOI: 10.18721/JE.13603
12. *Малышев А.В., Ланина Л.А.* Анализ ресурсного обеспечения региональных кластерных инициатив в регионах России на примере аудиовизуальных кластеров // *Креативная экономика*. 2021. Том 15. № 2. С. 341–358. DOI: 10.18334/ce.15.2.111579

REFERENCES

1. *Belyaeva E.L.* Bioclimatic Comfort and Conditions for Urban Development, Improvement and Greening. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2024; (1): 136–146. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-1-136-146 (In Russian)
2. *Vinnitsky M.V.* Approaches to Architectural and Urban Environmental Management in Harsh Northern Conditions. *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2023; (3): 37–43. DOI: 10.25628/UNIP.2023.58.3.006 (In Russian)
3. *Krasnopol'sky F.K.* Architectural and Planning Structure of Arctic Cities. *Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie*. 2020; (1): 266–268. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10064 (In Russian)
4. *Palkina O.L.* Planning and Design Principles in the Arctic based on Dynamic Architecture. *Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie*. 2020; (1): 263–266. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10063 (In Russian)

5. Galeev S.A. Adaptation of Architectural Systems to Extreme Environmental Conditions. *Sistemnye tekhnologii*. 2020; (4 (37)): 77–83. (In Russian)
6. Afanasyeva E.A., Li I.V. Translucent Membranes in the Spatial Planning Structure of Public Buildings. *Arkhitektura. Restavratsiya. Dizain. Urbanistika*. 2025; (1 (5)): 71–85. (In Russian)
7. Kornilov T.A., Alekseev N.N. Design Techniques in Architecture and Structure of Energy-Efficient Arctic Settlements. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2023; (3): 54–63. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-54-63 (In Russian)
8. Seletskaya K.V., Novikov S.V. Resource Conservation Principles of the Architecture of Arctic Settlements. *Izvestiya KSUAE*. 2018; 1 (43): 79–86. (In Russian)
9. Kosarev L.V., Vavilov V.I., Batrynyak L.V. Engineering Communications of a Public and Cultural Building in Northern Territories in Neryungri, Sakha (Yakutia). *Ekonomika stroitel'stva*. 2022; (10): 47–58. (In Russian)
10. Kosinova M.I., Gorshkova A.A. Cluster Approach in the Film Industry. *Vestnik universiteta*. 2022; (11): 94–102. DOI: 10.26425/1816-4277-2022-11-94-102 (In Russian)
11. Lanina L.A., Malyshev A.V., Romodanovskaya N.B. Analysis of Audiovisual Cluster Development in Regions (based on international experience). *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki*. 2020; 13 (6): 31–40. DOI: 10.18721/JE.13603 (In Russian)
12. Malyshev A.V., Lanina L.A. Resource Provision Analysis of Cluster Initiatives in Russian Regions based on the Example of Audiovisual Clusters. *Kreativnaya ekonomika*. 2021; 15(2): 341–358. DOI: 10.18334/ce.15.2.111579 (In Russian)

Сведения об авторах

Пономарев Евгений Сергеевич, канд. архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, Ponom_argo@mail.ru

Спиридонова Ия Петровна, магистрант, архитектор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, spiridonovaiya12345@gmail.com

Authors Details

Evgenii S. Ponomarev, PhD, A/Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1, Zelenaya Str., 420043 Kazan, Tatarstan, Russia

Iya P. Spiridonova, Graduate Student, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1, Zelenaya Str., 420043 Kazan, Tatarstan, Russia

Вклад авторов

Пономарев Е.С. – научное руководство; концепция исследования; обработка материала; научное редактирование текста; итоговые выводы.

Спиридонова И.П. – сбор материала; обработка материала; написание исходного текста; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Ponomarev E.S. – supervision, conceptualization, writing–review and editing.

Spiridonova I.P. – data curation, resources, writing–original draft preparation.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.11.2025
Одобрена после рецензирования 02.02.2026
Принята к публикации 02.02.2026

Submitted for publication 24.11.2025
Approved after review 02.02.2026
Accepted for publication 02.02.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 134–147.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 134–147.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 725.9

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-134-147

EDN: LIKNCL

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ

Оксана Васильевна Рожкова, Елена Степановна Астахова

*Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону, Россия*

Аннотация. В статье анализируется отечественный и зарубежный опыт проектирования высотных зданий в свете развития конструктивных систем, рассматриваются особенности формирования архитектуры небоскребов с учетом конструктивных решений, а также дается описание и сравнение архитектурных моделей высотных зданий.

Актуальность темы исследования. Ни один современный мегаполис нельзя представить без высотных зданий, формирующих композиционные акценты и силуэт в структуре городов. Стремительная урбанизация делает города похожими друг на друга, теряющими индивидуальность из-за однотипных архитектурных решений и фасадов. Решением данной проблемы может быть использование различных конструктивных систем высотных зданий с целью разнообразия архитектурного облика и внутренних планировок здания.

Цель работы – анализ формообразующих качеств основных конструктивных систем высотных зданий и выявление взаимообусловленности их конструкций и архитектурного облика.

Результатом исследования является анализ конструктивных систем, их влияния на внешний облик высотного здания, а также архитектурно-планировочные решения и экологические особенности. Предложены концепции высотного здания в крупных и крупнейших городах России, выполнен экспериментальный проект на территории г. Грозного.

Рассмотрены особенности формирования архитектуры высотных зданий в разных частях России с учетом региональных и культурных условий места проектирования (использование солнцезащитных устройств, традиционных узоров). Предложены архитектурные модели высотного здания (стандартная, южная и восточная) для расположения в разных частях страны, проведен их сопоставительный анализ, на основе которого произведен выбор самой эффективной модели для г. Грозного.

Ключевые слова: архитектура, конструктивные системы высотных зданий, высотные здания, каркасные, стеновые, ствольные, оболочковые конструктивные системы, небоскреб, архитектурный облик высотных зданий, архитектурные модели, классификация небоскребов

Для цитирования: Рожкова О.В., Астахова Е.С. Особенности формирования архитектуры высотных зданий с учетом конструктивных систем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 134–147. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-134-147. EDN: LIKNCL

ORIGINAL ARTICLE

HIGH-RISE BUILDING ARCHITECTURE WITH REGARD TO STRUCTURAL SYSTEMS

Oksana V. Rozhkova, Elena S. Astakhova

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

Abstract. No modern metropolis can be imagined without high-rise buildings, which create compositional accents and silhouettes within the city structure. Rapid urbanization makes cities similar to one another, losing their individuality due to uniform architectural design. A solution to this problem could be the use of different structural systems for high-rise buildings to diversify the architecture and interior layout.

Purpose: The aim of this work is to analyze the form-generating quality of the main structural systems of high-rise buildings and identify the interdependence between structures and architecture of high-rise buildings.

Methodology/approach: This article analyzes the Russian and foreign experience in the high-rise building design, considers the architecture formation taking into account structural systems, and describes and compares architectural models of high-rise buildings.

Research findings: The analysis is given to structural systems and their impact on high-rise building design, architectural planning solutions and environmental considerations. Concepts of high-rise buildings in major Russian cities are proposed, and a pilot project is completed in Grozny.

The article examines the development of high-rise building architecture in different parts of Russia, taking into account regional and cultural conditions of the design location (sun protection devices and traditional patterns). The proposed architectural models of high-rise buildings are standard, southern, and eastern, for locations in different parts of the country. A comparative analysis provides the selection of the most effective model for Grozny.

Keywords: architecture, structural system, high-rise building, skyscraper, architectural model, skyscraper classification

For citation: Rozhkova O.V., Astakhova E.S. High-Rise Building Architecture with Regard to Structural Systems. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 134–147. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-134-147. EDN: LIKNCL

Введение

Современный мегаполис трудно представить без высотных зданий. Их популярность вызвана необходимостью использовать участки земли городов наиболее эффективно. Проектирование высотного здания позволяет компактно расположить наибольшее количество помещений на меньшей площади. С учетом дорогого и технически сложного процесса строительства данного типа объектов высотное строительство является символом процветания и экономического роста страны.

Общее количество высотных зданий во всем мире уже превышает 10 000, и каждый год их количество растет [1]. Чикаго стал первым городом в мире, в котором появились высотные здания. Их появление связано с чикагским пожаром 1871 г., после которого пришлось восстанавливать город почти с нуля. После этого высотное строительство быстро охватило всю Америку.

В России первым небоскребом планировалось сделать Дворец Советов, который должен был занять место храма Христа Спасителя и иметь высоту 495 м

с учетом шпиля. Из-за начала Великой Отечественной войны проект был заморожен, несмотря на возведенный фундамент, и позже отменен полностью. Статус первых высотных зданий России получили сталинские высотки, которые начали возводиться в 1946 г. В настоящее время самые известные небоскребы России: «Москва-сити» (г. Москва), «Грозный-сити» (г. Грозный) и Лахта Центр (г. Санкт-Петербург), который является самым высоким зданием в Европе.

Конструктивные системы высотных зданий

Первые высотные здания в 10–12 этажей имели перекрестно-стенную конструктивную систему, а основным материалом выступал кирпич. В попытках увеличить высоту здания проектировщики увеличивали толщину стен первого этажа так, что она могла достигать 4 м.

В 1891 г. происходит переход на каркасную систему в качестве несущей конструкции. Сначала каркасы изготавливались из чугуна, который в дальнейшем был заменен на стальной прокат. Каркасные здания имели большое количество преимуществ перед стеновыми. Среди них – свободное от мощных капитальных кирпичных стен внутреннее пространство, стоимость конечной конструкции [2, 3].

В 1960–1980 гг. значительно расширяется область применения стальных конструкций. В этот же период начинается широкое использование железобетонных конструкций, которые являются более дешевым материалом. Поскольку железобетон хорошо воспринимает нагрузки, начало его использования дало импульс к развитию новых конструктивных схем. Также в эти годы начинают внедряться ствольные и оболочковые конструктивные системы [4].

В 1970–1980 гг. начинается активное использование новых комбинированных (составных) конструктивных систем, которые состоят из бетона, железобетона и прокатных или сварных стальных профилей [5].

Выбор конструктивной системы очень важен при проектировании высотных зданий, т. к. такие объекты относятся к самому высокому классу надежности и ответственности. При строительстве высотного здания используются различные системы и варианты их компоновок, но все это многообразие можно разделить на следующие основные группы: каркасные, стеновые, ствольные, оболочковые и комбинированные [6, 7].

Каркасные конструктивные системы отличаются тем, что ригели каркаса и колонны в качестве стержневых вертикальных опор в результате совместной работы обеспечивают пространственную жесткость [8, 9]. Например, в небоскребе *Hears Tower* высотой 182 м (г. Нью-Йорк, США, 2006 г.) конструктивная система представляет собой ребра сетчатой структуры, которые опираются на 12 стальных колонн в старой части здания, при этом вся система принимает на себя нагрузку с перекрытий, образуя единую пространственную конструкцию (рис. 1). А в *Башне Эволюции* (г. Москва, Россия, 2014 г.) конструктивная система состоит из 8 вертикальных колонн на всю высоту здания и 4 угловых колонн со спиралевидной геометрией. Благодаря такому каркасу здание поворачивается вокруг своей оси на 156° (рис. 1).

Каркасные конструктивные системы являются наиболее распространенными в высотном строительстве, т. к. могут использоваться для зданий различного функционального назначения. При этом каркасные конструктивные си-

стемы можно разделить на следующие подгруппы: рамно-каркасные, каркасные с диафрагмами жесткости и каркасно-ствольные.



Рис. 1. Каркасные конструктивные системы:
 а – Hears Tower, США¹; б – Башня Эволюция, Россия²
 Fig. 1. Frame structural systems:
 а – Hears Tower, USA [8]; б – Evolution Tower, Russia

В стеновых конструктивных системах стены выполняют роль конструктивных элементов. При этом перекрытия являются горизонтальными диафрагмами. Поскольку данные конструктивные системы не имеют возможности создавать свободную планировку, чаще всего они используются в зданиях с жилым назначением. Самым известным примером стеновой конструктивной системы в высотном здании является *Colonia-Haus* (г. Кельн, Германия, 1973 г.) (рис. 2).



Рис. 2. Стеновые конструктивные системы: Colonia-Haus, Германия³
 Fig. 2. Wall structural systems in Colonia-Haus, Germany

¹ URL: <https://images2.dwell.com/photos/6063391372700811264/6133455094667894784/original.jpg?auto=format&q=35&w=480>

² URL: https://stroj.mos.ru/uploads/media/main_image/0002/26/12c3a7f0cba7b283fab61a582ae4cefc39a156bb.jpeg

³ URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/72/Colonia-Haus_2013-04-01-003_variante.JPG/120px-Colonia-Haus_2013-04-01-003_variante.JPG; https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Colonia-Haus,_K%C3%B6ln-4135.jpg

Ствольные конструктивные системы отличаются тем, что основной частью конструкции является ствол, который воспринимает все нагрузки в здании. Обычно ствол состоит из монолитных стен или отдельных диафрагм, которые объединены в один пространственный элемент. Такие системы наиболее популярны в сейсмически опасных районах. В здании банка *HSBC* (г. Гонконг, Китай, 1985 г.) конструктивная система состоит из 4 опорных башен, которые и воспринимают всю нагрузку. Раскосные горизонтальные фермы, которые расположены через каждые 8 этажей, связывают всю конструкцию и передают нагрузку через опорные башни на землю. Центральные подвесы поддерживают межэтажные перекрытия, а крестовые раскосы служат соединительным звеном внутри (рис. 3). А в *Aspire Tower* (г. Доха, Катар, 2007 г.) конструктивная система состоит из железобетонного ствола с разным диаметром – от 12 до 18 м. Все перекрытия являются подвесными и фиксируются на основном столбе за счет сети балок на каждом этаже строительных модулей. Сами модули представляют собой группу из стальных колонн, металлического настила, бетонных плит и наружных компрессионных кольцевых балок, которые служат поддержкой для наружных стен облицованных стеклянными панелями. Балки и стальные распорки, которые крепятся болтами к центральному столбу и передают нагрузку от колонн по периметру и кольцевых балок на ядро, связывают всю конструкцию вместе (рис. 3).



Рис. 3. Ствольные конструктивные системы:

a – здание банка HSBC, Китай⁴; *б* – Aspire Tower, Катар⁵

Fig. 3. Barrel structural systems:

a – the HSBC Bank, China; *b* – Aspire Tower, Qatar

В *оболочковых конструктивных системах* наружная стеновая коробка является несущим элементом. Эта коробка чаще всего представляет собой жесткую пространственную решетку, которая может быть раскосной или безраскосной. Нагрузки в здании с такой конструкцией распределяются следующим образом: горизонтальные нагрузки воспринимает решетка, а вертикаль-

⁴ URL: <https://i.pinimg.com/736x/33/d9/aa/33d9aa77d79d8fee1c8df2b714b21621.jpg>

⁵ URL: <https://i.pinimg.com/originals/ec/2d/c1/ec2dc136c366a01a2e219d5165926be0.jpg>

ные переходят на внутреннюю вертикальную опору, которая обычно представляет собой столб. Обычно оболочковые системы используются в уникальных зданиях, например *Международный финансовый центр Гуанчжоу* (г. Гуанчжоу, Китай, 2010 г.) (рис. 4). Стальная сетка и железобетонный ствол образуют оболочку, благодаря которой снижается воздействие ветра на конструкцию здания. А в *Capital Gate* (г. Абу-Даби, ОАЭ, 2011 г.) использовали две оболочки из-за уклона здания. Само здание было первым в мире, в котором применили технологию диагональной решетки. Внешняя решетка, образующая форму башни, воспринимает нагрузку от пола и передает ее на внутреннюю решетку, которая соединена с центральным ядром штифтами и передает всю нагрузку на него (рис. 4). Благодаря такой конструктивной системе в здании отсутствует необходимость в колоннах.



Рис. 4. Оболочковые конструктивные системы:

a – Международный финансовый центр Гуанчжоу, Китай⁶; *б* – Capital Gate, ОАЭ⁷

Fig. 4. Shell-shaped structural systems:

a – Guangzhou International Financial Center, China; *b* – Capital Gate, UAE

Модели архитектуры высотных зданий на основе ствольной конструктивной системы

На основании проведенного исследования в качестве основы была выбрана ствольная конструктивная система, которая является наиболее устойчивой к сейсмической активности и, соответственно, позволяет разместить ее в большем количестве регионов с разными климатическими и сейсмическими условиями. В соответствии с этим в исследовании были предложены следующие модели конструктивной системы высотного здания: а) с консольными перекрытиями в уровне каждого этажа; б) с консолями высотой на этаж в уровне

⁶ URL: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSbTV3h2eolJSfCGlPAiXMq_xTaJMrRNuSC4g&s

⁷ URL: https://s.yimg.com/ny/api/res/1.2/ykIMreAx3trN1nZhzhx5SQ--/YXBwaWQ9aGlnaGxhbmRlcjt3PTEyMDA7aD05MDA-/https://media.zenfs.com/en/insider_articles_922/7d2d08103d0952694030bcd8ac098782

каждого второго этажа; в) с подвешенными перекрытиями; г) с подвешенными блоками.

Модель с консольными перекрытиями в уровне каждого этажа (рис. 5) предполагает, что этажи подвешиваются консольно на несущий ствол, при этом роль звена, обеспечивающего жесткость, выполняют растяжки, соединяющие край перекрытия и ствол.

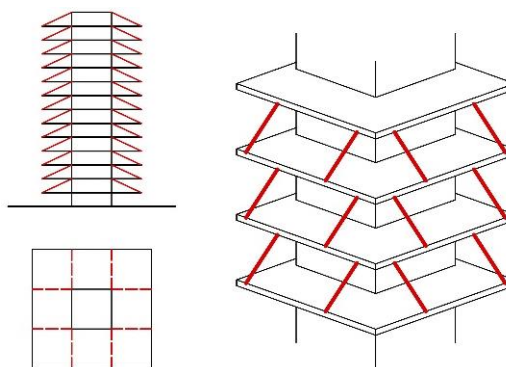


Рис. 5. Модель с консольными перекрытиями в уровне каждого этажа

Fig. 5. A model with cantilever ceilings at each floor

При выборе модели с консолями высотой на этаж в уровне каждого второго этажа (рис. 6) жесткость обеспечивается стойками, которые соединяют между собой каждые два этажа. Несмотря на то что этажи подвешиваются на ствол также консольно, вертикальные конструктивные элементы обеспечивают жесткость.

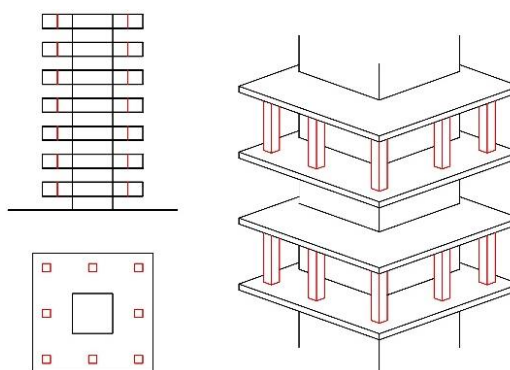


Рис. 6. Модель с консолями высотой на этаж в уровне каждого второго этажа

Fig. 6. A model with consoles one floor high at each second floor

Модель с подвешенными этажами (рис. 7) отличается от модели с консольными перекрытиями за счет ферм, на которые подвешивают этажи на несущий ствол. Такие фермы расположены через каждые несколько этажей, а жесткость нижних этажей обеспечивается за счет стоек, прикрепленных к фермам.

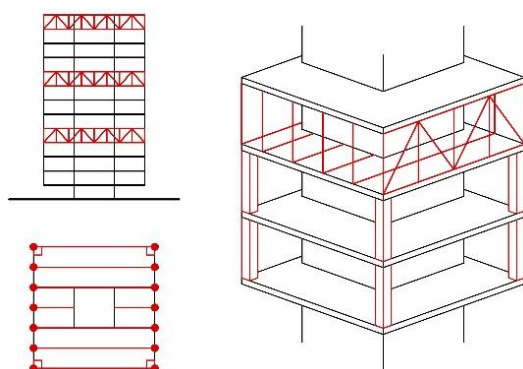


Рис. 7. Модель с подвешенными этажами

Fig. 7. The model with suspended floors

В модели с подвешенными блоками (рис. 8) несущий ствол принимает на себя нагрузку от цельных жестких блоков, подвешенных на него. В самих же блоках жесткость обеспечивается с помощью ферм, которые прикреплены к стволу шарнирами, и вертикальных стоек, на которые подвешиваются нижние этажи.

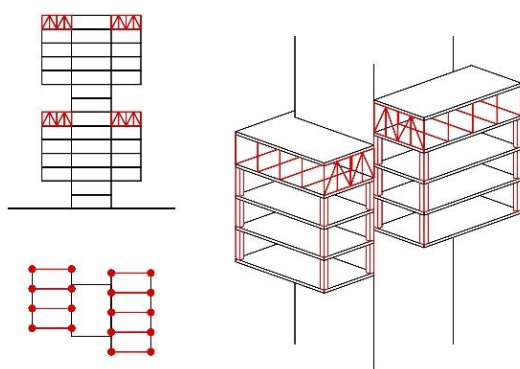


Рис. 8. Модель с подвешенными блоками

Fig. 8. The model with suspended blocks

Среди ствольных конструктивных систем также можно выделить системы с чистым ядром жесткости, в которых используются консольные или подвешенные системы (рис. 9).

При использовании консольных систем этажи монтируются к несущему стволу за счет шарнирных соединений. Такое решение позволяет освободить внутреннее пространство от большого количества колонн, но необходимо использование стоек для крепления этажей между собой. Архитектурный облик при выборе такой конструктивной системы может иметь значительные отличия от стандартных систем, т. к. консольные этажи могут иметь абсолютно разное положение на стволе.

При применении подвешенных систем этажи крепятся к несущему стволу за счет ростверков и подвесок. От задумки архитектора зависит распо-

ложение ростверков: они могут располагаться только сверху, а могут через каждые несколько этажей или через каждый. При этом ростверки могут являться фасадными элементами, создавая необычный внешний облик.

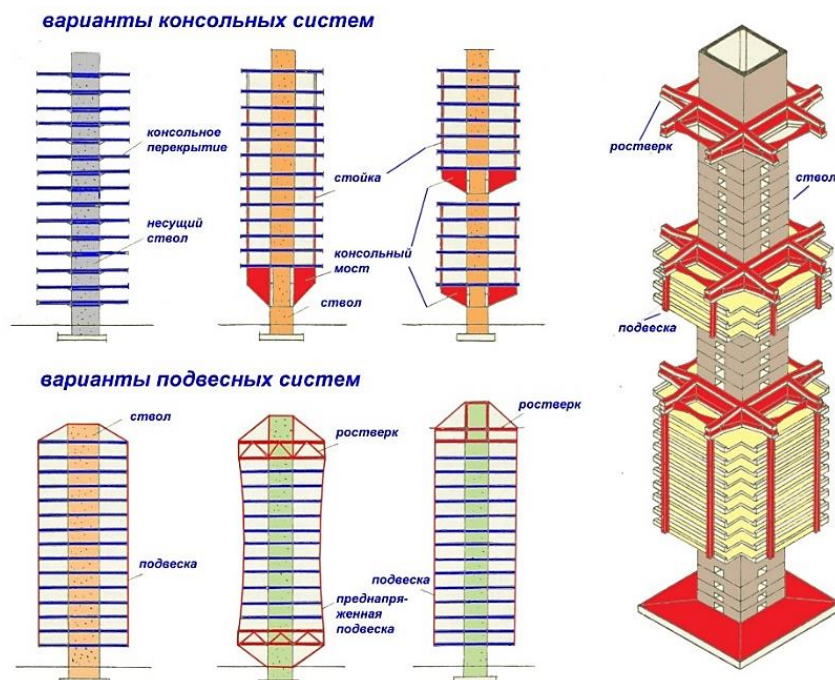


Рис. 9. Консольные и подвесные системы высотных зданий⁸

Fig. 9. Cantilever and suspension systems of high-rise buildings

В результате сравнительного анализа моделей конструктивных систем наиболее выгодной выбрана модель с подвешенными блоками, т. к. из-за своей необычной формы она создает ощущение, что здание «парит», касаясь земли лишь центральным ядром.

Модели архитектурного облика высотного здания на основе конструктивной системы

Помимо конструктивных систем важным формообразующим фактором являются климатические и региональные особенности места проектирования. В связи с этим в исследовании были разработаны следующие модели архитектурного облика высотного здания: 1) стандартная; 2) южная; 3) восточная.

Стандартная модель (рис. 10) предполагает стандартный внешний облик высотного здания: конструктивные элементы и остекление. Данная модель может размещаться в регионах европейской и сибирской частях страны, где отсутствует активное солнце, т. к. большое количество остекления вызывает перегрев.

⁸ URL: https://sun9-12.userapi.com/imp/g4s86CjnZkuto-3HQq6R4EL0iFoRv4xjKHLrew/wa837kDEGal.jpg?size=960x743&quality=95&sign=0b6788473ee02f33461107e2fcd783ae&c_uniq_tag=qPM-3Kucc_TS0MohUSbrQs9w1ChrPdJ2NK0IdlJxR-w&type=album

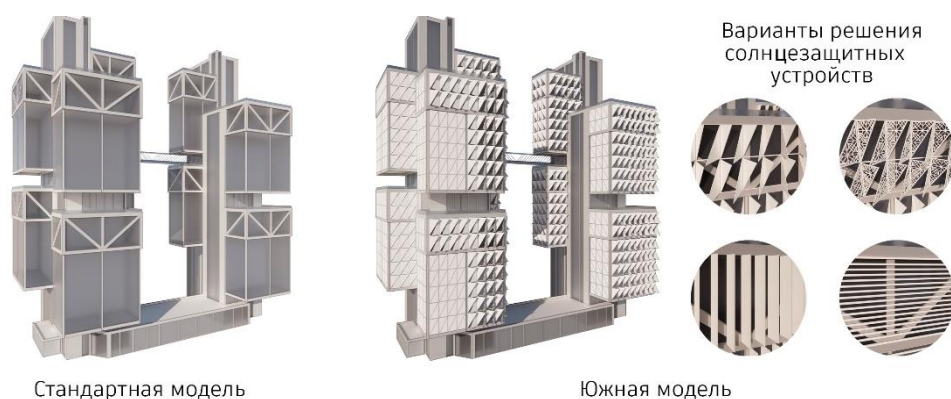


Рис. 10. Стандартная и южная модели фасада
Fig. 10. The standard and southern facade models

Южная модель (рис. 10) предназначена для размещения в районах с жарким климатом, где большое количество солнечных дней и, соответственно, сильный перегрев. Отличие южной модели от стандартной заключается в размещении солнцезащитных устройств на фасадах здания, которые реагируют на интенсивность освещения в течение дня. Данная модель может размещаться в Ростовской области или Краснодарском крае.

Восточная модель (рис. 11) предполагает размещение в Северо-Кавказском федеральном округе. Помимо жаркого климата, этот регион отличается особенностями региональной культуры, такими, например, как сочетание европейского уклада жизни с восточным. В связи с этим модель, разработанная для восточной (Северный Кавказ) части России, отличается не только применением солнцезащитных устройств из-за климата, но и их внешним видом, а именно использованием традиционных исламских орнаментов, например машрабии.

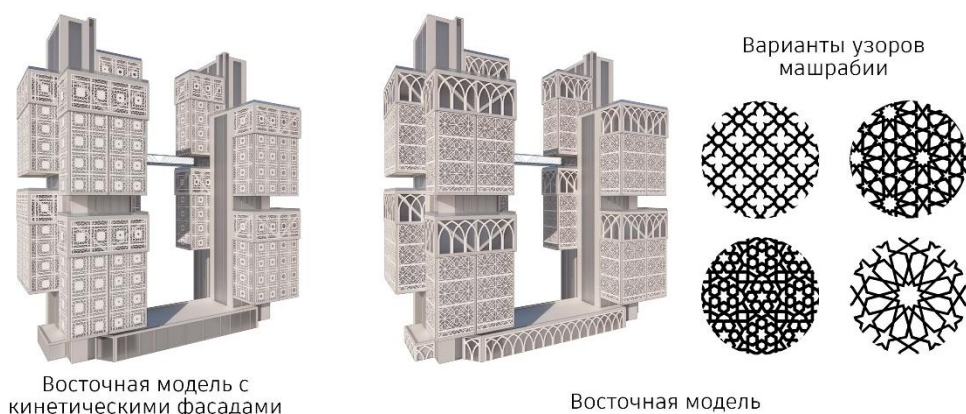


Рис. 11. Восточная модель фасада
Fig. 11. The eastern facade model

Машрабия применялась в архитектуре восточных стран еще со времен Средневековья. Благодаря резным узорам помещения были скрыты от посторон-

них глаз с улицы, при этом изнутри все хорошо просматривалось. Также обеспечивалась естественная циркуляция воздуха. Для машрабии всегда использовались традиционные исламские узоры и мотивы. Архитекторы часто обращаются к машрабии в своих работах. Самые известные примеры таких зданий: Институт Арабского мира в Париже, Burj Doha в Дохе, Лувр в Абу-Даби и др. [10].

На основе вышеизложенных моделей был проведен сравнительный анализ, в результате которого для проектирования в г. Грозном была выбрана модель конструктивной системы с подвешенными блоками и использование машрабии в качестве солнцезащитных устройств. Благодаря выбору ствольной конструктивной системы с блоками обеспечивается устойчивость здания в районе с сейсмической опасностью, а машрабия на фасадах позволяет уменьшить перегрев объема и вписать здание в существующую застройку в восточном стиле.

Расположение высотного здания в структуре г. Грозного

В рамках исследования были рассмотрены два варианта расположения высотного здания в г. Грозном. В первом варианте (рис. 12) комплекс состоит из двух зданий, которые объединены между собой на первых этажах торговым центром, а на уровне 26-го этажа – подвесным мостом. При данном варианте здание гармонично вписывается в существующую застройку, состоящую из мечети «Сердце Чечни» и комплекса небоскребов «Грозный-сити».

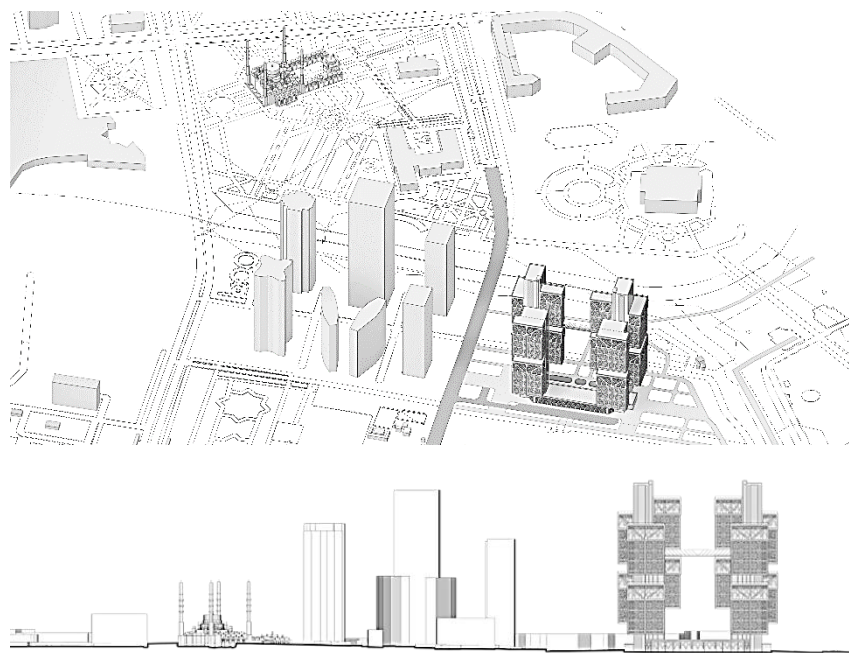


Рис. 12. Первый вариант расположения здания в структуре г. Грозного (по ул. Умара Димаева)
Fig. 12. The first variant of the building location in Grozny (in Umar Dimaev Street)

При втором варианте (рис. 13) комплекс состоит из 4 обособленных зданий, которые не соединены между собой. Их расположение на участке повторяет

изгиб р. Сунжи. Однако данный вариант здания «перебивает» застройку, т. к. мететь попадает между двумя высотными комплексами и теряется на их фоне.

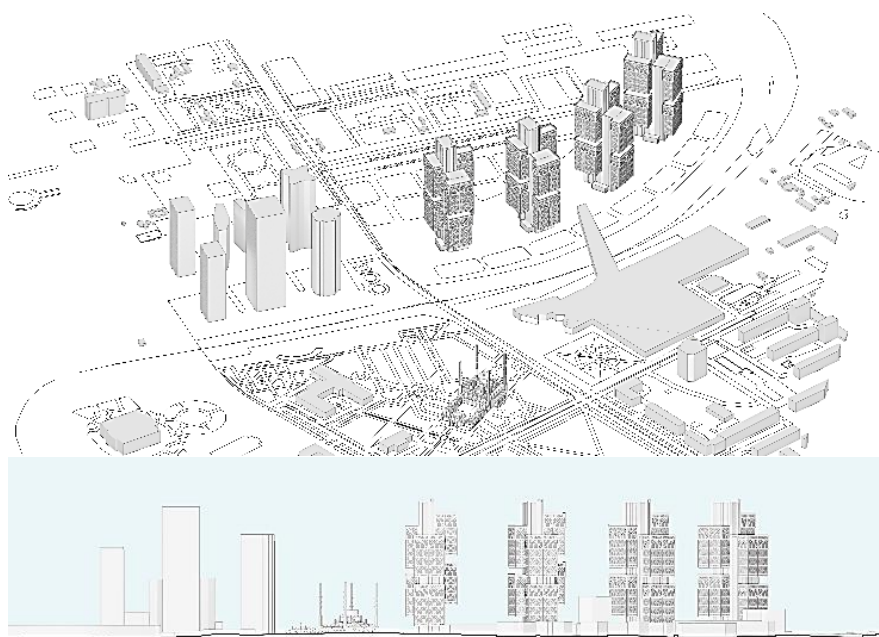


Рис. 13. Второй вариант расположения здания в структуре г. Грозного
Fig. 13. The second variant of the building location in Grozny

На основании анализа расположения высотного здания в структуре города был выбран первый вариант, т. к. при рассмотрении развертки он является наиболее удачным и не «перебивает» существующую окружающую застройку (рис. 14).

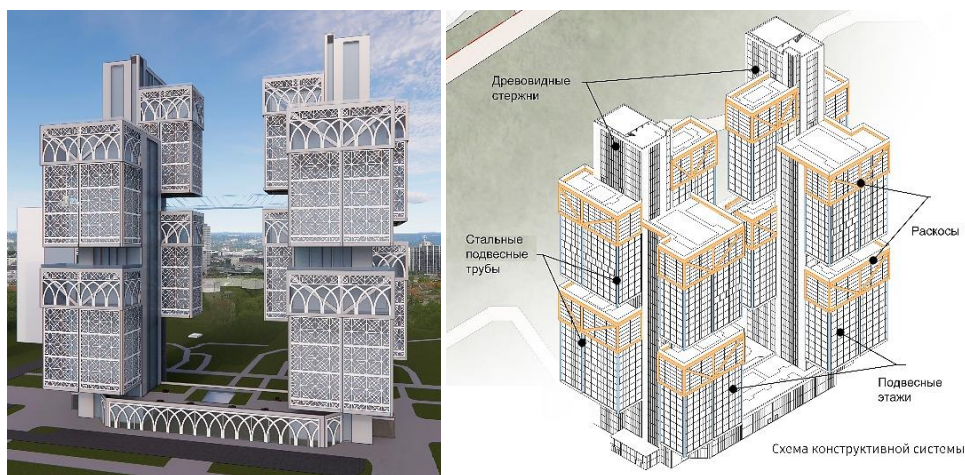


Рис. 14. 3D-модель высотного здания (а) и схема конструктивного решения (б)
Fig. 14. 3D model of a high-rise building and design solution

Результаты исследования:

- выявление архитектурных особенностей высотных зданий с учетом конструктивных систем, взаимообусловленности конструкции и архитектурной формы;
- анализ алгоритма взаимосвязи конструктивных систем и архитектурных форм;
- разработка архитектурных моделей высотных зданий и их архитектурных форм на основе ствольной конструкции с учетом региональных и природно-климатических условий: стандартной, южной и восточной (для расположения в разных частях страны);
- реализация выявленных положений в проектном предложении высотного здания в структуре г. Грозного.

Выводы

Использование различных конструктивных систем высотных зданий с целью разнообразия архитектурного облика создаст запоминающиеся композиционные акценты и силуэт в структуре городов.

Учет природно-климатических и региональных особенностей внесет архитектурно-художественный колорит в фасадные и объемные решения при проектировании высотных зданий в разных частях страны.

Модели – стандартная, восточная и южная – делают возможным размещение высотных зданий на территориях с разным климатом и национальным колоритом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Веселова Е.А., Комишин С.В.* Конструктивные системы жилых высотных зданий. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2022. 141 с. ISBN 978-5-528-00495-2.
2. *Этапы развития конструкций высотных зданий* – технические характеристики // РосПайп : [сайт]. URL: https://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/proektirovanie-zdaniy-i-sooruzheniy/etapy-razvitiya-konstruktsiy-vysotnykh-zdaniy/ (дата обращения: 01.05.2025).
3. *Колесников А.И.* Анализ истории высотного строительства в мире // Молодой ученый. 2020. № 6 (296). С. 61–65.
4. *Исторические этапы развития конструктивных систем высотных зданий* // Studme.org : [сайт]. URL: <https://studme.org/406709/stroitelstvo/istoricheskie-etapy-razvitiya-konstruktivnyh-sistem-vysotnyh-zdaniy> (дата обращения: 01.05.2025).
5. *Шуллер В.* Конструкции высотных зданий. Пер. с англ. Стройиздат, 1979. 248 с.
6. *Генералов В.П.* Особенности проектирования высотных зданий. Самара, 2009. 296 с. ISBN 978-5-9585-0332-2.
7. *Денисова А.П.* Несущий остов многоэтажных и высотных зданий. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 108 с. ISBN 978-5-7433-2070-7.
8. *Козлов М.В., Безбородов Е.Л.* Конструктивные схемы высотных зданий // Вестник МГСУ. Строительство и архитектура/ 2011. № 1. С. 153–160.
9. *Мустакимов В.Р., Якунов С.Н.* Проектирование высотных зданий. Казань : Изд-во Казанск. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. 243 с. ISBN 978-5-7829-0455-5.
10. *Reimagining The Mashrabiya: Functionality and Symbolism in Contemporary Architecture* // ArchDaily : [сайт]. URL: <https://www.archdaily.com/1014637/reimagining-the-mashrabiya-functionality-and-symbolism-in-contemporary-architecture> (дата обращения: 01.05.2025).

REFERENCES

1. *Veselova E.A., Komshina S.V.* The Structural System of Stubborn Veins Building. Nizhny Novgorod State Architecture. 2022. 141 p. ISBN 978-5-528-00495-2. (In Russian)

2. Stages of development of structures of high-rise buildings – technical characteristics. Available: https://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/proektirovanie-zdaniy-i-sooruzheniy/etapy-razvitiya-konstruktsiy-vysotnykh-zdaniy/ (accessed May 1, 2025). (In Russian)
3. *Kolesnikov A.I.* Historical Analysis of High-Rise Construction in the World. *Molodoi uchenyi*. 2020; (6 (296)): 61–65. Available: <https://moluch.ru/archive/296/67212/> (accessed May 1, 2025). (In Russian)
4. Historical stages of development of structural systems of high-rise buildings. Design of high-rise buildings. Available: https://studme.org/406709/stroitelstvo/istoricheskie_etapy_razvitiya_konstruktivnyh_sistem_vysotnyh_zdaniy (accessed May 1, 2025). (In Russian)
5. *Schueler V.* High-Rise Buildings. Moscow: Stroizdat, 1979. 248 p. (In Russian translation)
6. *Generals V.P.* High-Rise Building Design. Samara, 2009. 296 p. ISBN 978-5-9585-0332-2. (In Russian)
7. *Denisova A.P.* High-Rise Building Supports. Saratov, 2009. 108 p. ISBN 978-5-7433-2070-7. (In Russian)
8. *Kozlov M.V., Bezborodov E.L.* Structural Diagrams of High-Rise Buildings. *Vestnik MGSU*. 2011; (1): 153–160. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/konstruktivnye-shemy-vysotnyh-zdaniy-1/viewer> (accessed May 1, 2025). (In Russian)
9. *Mustakymov V.R., Yakupov S.N.* High-Rise Building Design. Kazan, 2014. 243 p. ISBN 978-5-7829-0455-5. (In Russian)
10. Reimagining the Mashrabiya: Functionality and symbolism in contemporary architecture. Available: www.archdaily.com/1014637/reimagining-the-mashrabiya-functionality-and-symbolism-in-contemporary-architecture (accessed May 1, 2025).

Сведения об авторах

Рожкова Оксана Васильевна, магистрант, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344082, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39, okrozhkova@sfedu.ru

Астахова Елена Степановна, канд. архитектуры, доцент, Академия архитектуры и искусств Южного федерального университета, 344082, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, 39, esastahova@sfedu.ru; astlena@mail.ru

Authors Details

Oksana V. Rozhkova, Graduate Student, The Academy of Architecture and Arts, Southern Federal University, 39 Budennovskiy Ave., 344082, Rostov-on-Don, Russia, okrozhkova@sfedu.ru

Elena S. Astakhova, PhD, A/Professor, The Academy of Architecture and Arts, Southern Federal University, 39 Budennovskiy Ave., 344082, Rostov-on-Don, Russia, esastahova@sfedu.ru; astlena@mail.ru

Вклад авторов

Рожкова О.В. – исследование; написание исходного текста; проект высотного здания; иллюстрации; итоговые выводы.

Астахова Е.С. – научное руководство; концепция исследования; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Rozhkova O.V. – investigation, writing—original draft preparation, high-rise building project, illustrations.

Astakhova E.S. – supervision, conceptualization, writing—review and editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.11.2025
Одобрена после рецензирования 05.02.2026
Принята к публикации 05.02.2026

Submitted for publication 29.11.2025
Approved after review 05.02.2026
Accepted for publication 05.02.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 148–168.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 148–168.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.072.221

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-148-168

EDN: MLFZVL

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Эрес Кечил-оолович Опбул^{1,3}, Гурий Николаевич Ширунов²,
Анай-Хаак Бугалдаевна Калдар-оол³, Светлана Сергеевна Саая³

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

²Военный институт (инженерно-технический) Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А.В. Хрулева, г. Санкт-Петербург, Россия

³Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Россия

Аннотация. Актуальность. Деформационный метод расчета конструкций признается более точным и достоверным, поскольку базируется на опытных диаграммах деформирования материалов (бетон и арматура). При этом в практике проектирования пока отсутствуют развернутые примеры расчета трещиностойкости и жесткости изгибаемых железобетонных элементов с применением деформационной модели – несмотря на ее удобство и возможность быстрого получения результатов посредством итерационных процедур.

Цель. Выполнить практический деформационный расчет трещиностойкости и жесткости изгибаемого железобетонного элемента (вторая группа предельных состояний), используя расчетные параметры, полученные из расчета деформационной прочности конструкции (первая группа предельных состояний).

Методы. Исследование опирается на исходные данные и расчетные параметры, полученные при расчете прочности. Методика включает следующие этапы: определение момента трещинообразования путем суммирования внутренних усилий, возникающих от нормальных напряжений в каждом малом участке; вычисление базового расстояния между смежными трещинами с учетом площади растянутой зоны сечения в предельном состоянии; расчет ширины раскрытия трещин в зависимости от напряжений в растянутой

арматуре; определение прогиба элемента с учетом максимальной кривизны, вычисленной с применением модуля деформаций.

В работе приведены принятые допущения и предпосылки, а также теоретические формулы с учетом расчетных предельных деформаций и напряжений (в том числе модулей деформаций).

Результаты. Выполнен практический пример расчета и проведен сравнительный анализ с подсчетом процентного расхождения результатов между деформационным и нормативным (по предельным состояниям) методами. Сформулированы выводы исследования. Новизна работы заключается в разработке алгоритма практического расчета трещиностойкости и жесткости изгибаемого элемента на основе деформационной модели расчета конструкций.

Ключевые слова: деформационная модель, нелинейный расчет, деформации, напряжения, трещиностойкость, жесткость, прогиб, бетон, арматура

Для цитирования: Опбул Э.К., Ширунов Г.Н., Калдар-оол А.-Х.Б., Саая С.С. Трещиностойкость и жесткость изгибаемых железобетонных конструкций на основе нелинейной деформационной модели // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 148–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-148-168. EDN: MLFZVL

ORIGINAL ARTICLE

CRACK RESISTANCE AND RIGIDITY OF BENDING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON A NONLINEAR DEFORMATION MODEL

Eres K. Opbul^{1,3}, Gury N. Shirunov²,
Anai-Khaak B. Kaldar-ool³, Svetlana S. Saaya³

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

²Military Engineering Institute of the Military Logistics Academy,
Saint-Petersburg, Russia

³Tuvan State University, Kyzyl, Russia

Abstract. The deformation method for the structural analysis is recognized as more accurate and reliable, as it is based on experimental deformation diagrams of materials (concrete and reinforcement). However, in practice, there are still no detailed examples of calculating the crack resistance and rigidity of bending reinforced concrete elements using a deformation model, despite its convenience and the ability to quickly obtain results through iterative procedures.

Purpose: The aim is to calculate deformation of crack resistance and rigidity of bending reinforced concrete elements (service limit state), using design parameters obtained from calculating the deformation strength of the structure (ultimate limit state).

Methodology: The study is based on initial data and design parameters obtained in the strength calculation. The methodology includes the following steps: determination of the crack formation moment by summing internal forces, arising from normal stresses in each small section; calculation of the distance between adjacent cracks, taking into account the tensile zone in the limit state; calculation of the crack opening width depending on stresses in tensile reinforcement. Determination of the element deflection taking into account the maximum curvature calculated using the deformation modulus.

The paper also presents the adopted assumptions and prerequisites, theoretical formulas with respect to calculated ultimate strains and stresses (including the strain modulus).

Research findings: A practical calculation example was performed, and a comparative analysis was conducted, calculating the percentage difference in between the deformation and standard (limit state) methods.

Value: The novelty of the paper lies in the algorithm development for practical calculation of the crack resistance and rigidity of bending element based on the deformation model for the structural analysis.

Keywords: deformation model, nonlinear calculation, strain, stress, crack resistance, rigidity, deflection, concrete, reinforcement

For citation: Opbul E.K., Shirunov G.N., Kaldar-ool A.-Kh.B., Saaya S.S. Crack Resistance and Rigidity of Bending Reinforced Concrete Structures Based on a Non-linear Deformation Model. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 148–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-148-168. EDN: MLFZVL

Введение

Объектом исследования является изгибающий железобетонный элемент, нагруженный равномерно распределенной нагрузкой.

Цель исследования – выполнить практический расчет трещиностойкости и жесткости изгибаемого железобетонного элемента (вторая группа предельных состояний) в зависимости от расчетных параметров, предварительно вычисленных по деформационной модели расчета прочности (первая группа предельных состояний) [1].

Актуальность работы. Деформационный метод расчета конструкций производится с применением двухлинейной или трехлинейной диаграмм деформирования материалов, полученных опытным путем, в связи с этим они могут более точно и подробно описывать изменения, происходящие в бетоне и арматуре конструкции под действием внешней нагрузки.

В настоящее время фактически отсутствуют работы, посвященные практическому расчету трещиностойкости и жесткости конструкций с применением нелинейной деформационной модели. Очевидно, что определение предельных внутренних усилий трещинообразования и деформаций, основанное на деформационной модели, может наиболее близко соответствовать фактическим показателям.

Новизной работы является создание алгоритма практического расчета трещиностойкости и жесткости изгибаемого элемента, основанного на деформационной модели расчета прочности.

Предлагаемый деформационный расчет трещиностойкости и жесткости изгибаемого элемента основан на исходных данных и расчетных параметрах, вычисленных в расчете прочности [1], и состоит из следующих пунктов:

- момент образования трещин M_{crc}^{defor} определяется суммированием внутренних усилий по формуле (1), возникающих от нормальных напряжений в каждом малом участке или слое;

- базовое расстояние между смежными трещинами l_s^{defor} определяется по формуле (2) с учетом площади растянутой зоны сечения A_{bt}^{defor} в предельном состоянии;

– ширина раскрытия трещин a_{crc}^{defor} определяется по формуле (3) в зависимости от напряжений в растянутой арматуре при достижении максимальной величины кривизны элемента. Коэффициент, учитывающий неравномерность деформаций между трещинами в предлагаемом методе, ψ_s^{defor} определяется с учетом момента образования трещин M_{crc}^{defor} и несущей способности элемента M^{defor} по формуле (4), величина M^{defor} определяется на основе нашей прошлой статьи [1];

– прогиб элемента по деформационному методу определяется по формуле (6), где кривизна элемента находится по формуле (5) с учетом M^{defor} , численного в [1], и модуля деформаций E_b' .

Практические расчеты прочности по деформационной модели, применительно для изгибаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов, выполненные авторами, были реализованы в ряде работ [1–4], где контролируемые критериями были приняты предельные деформации материалов [5, 6] сжатой ($\varepsilon_b = 3,5 \cdot 10^{-3}$) и растянутой ($\varepsilon_s = 0,025$) зон нормального сечения.

Общеизвестно [5–12], что расчеты по трещиностойкости и жесткости несущих конструкций выполняют, чтобы предотвратить наступление второго предельного состояния, при котором конструкции теряют свои эксплуатационные качества вследствие чрезмерных прогибов или чрезмерного раскрытия трещин.

Известны работы, посвященные аналитическим и численным расчетам изгибаемых железобетонных элементов [13–38], где рассматриваются актуальные вопросы по безопасному и оптимальному проектированию несущих конструкций, а также возможность применения композитной арматуры из полимеров, комбинированных элементов из нескольких материалов (ламинированной фанеры, фибробетона, стали). Среди них можно выделить работы, где получены прочные и легкие конструкционные материалы, армированные различными синтетическими полимерами, в том числе на основе коррозионно-стойкой нержавеющей стали. В работах [37, 38] на принципах нелинейного деформирования материалов отмечается влияние нелинейных свойств бетона и арматуры на точность при численном расчете прогибов железобетонных балок.

Ниже приводятся теоретические исследования только для деформационной модели расчета, а в разделе с результатами представлено сравнение результатов расчетов предлагаемого деформационного метода с уже известными нормативными методами.

1. Методы исследования

Расчет момента образования трещин, базового расстояния между трещинами, ширины раскрытия трещин, в том числе прогиба элемента по деформационной модели, производится при наличии следующих расчетных параметров, которые должны быть известны из расчета прочности, в данном случае они принимаются из работы [1]:

- i – порядковый номер слоя или стержневой продольной арматуры;
- j – порядковый номер итерации;

$\Delta_{bi}, y_{bi}, b_{bi}, A_{bi}$ – высота i -го слоя, расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести i -го слоя, ширина и площадь i -го слоя бетона соответственно;

E_b, E'_{bi} – модуль упругости и модуль деформаций бетона соответственно;

$y_{si}, A_{si}, E_s, E'_{si}$ – расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести i -го слоя, площадь, модуль упругости и модуль деформаций i -й арматуры соответственно;

y_t – положение нейтральной линии в сечении в упругой стадии работы, обозначаемое как «N.L.»;

$y_{0,j}$ – положение нейтральной линии «N.L.» в сечении в предельной стадии работы элемента;

y'_{bi} – расстояние от нейтральной линии «N.L.» до центра тяжести i -го слоя (плечо пары сил);

ε_{s2} и σ_{s2} – максимальные деформации и напряжения в арматуре растянутой зоны, соответствующие напряженно-деформированному состоянию, при котором достигается максимальная величина кривизны элемента;

$M^n; M^{defor}$ – нормативная и деформационная прочности ригеля соответственно.

Перечисленные расчетные параметры представлены в разделе с результатами в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2, где i – порядковый номер слоя; Δ_{bi} – высота слоев; y_{bi} – расстояние от края растянутой зоны до центра тяжести i -го слоя; b_{bi} – ширина i -го слоя бетона; A_{bi} – площадь сечения i -го слоя бетона; E'_{bi} – модуль упругости (деформации) i -го слоя бетона; y_{si} – расстояние от края растянутой зоны до центра тяжести i -й арматуры; A_{si} – площадь сечения i -й арматуры; E'_{si} – модуль упругости (деформации) i -й арматуры; y_{0j} – расстояние от края растянутой зоны до нейтральной линии; y'_{bi} – расстояние от нейтральной линии до центра тяжести i -го слоя бетона; y'_{si} – расстояние от нейтральной линии до центра тяжести.

1.1. Деформационный момент образования трещин (M_{crc}^{defor})

Принимаются следующие допущения и предпосылки:

– справедлива гипотеза плоских сечений, нормальное сечение элемента плоское до изгиба и остается плоским после изгиба;

– эпюры деформаций и напряжений имеют треугольные формы, наличие неупругих деформаций учитывается умножением на коэффициент $\gamma = 1,25$;

– краевые деформация и напряжение растянутой зоны сечения при двухлинейной диаграмме деформирования бетона равны: $\varepsilon_{bt,extreme} = \varepsilon_{bt1,red} = 8 \cdot 10^{-5}$, $\sigma_{b,extreme} = R_{bt,ser}$;

– нейтральная линия ($N.L.$) перед образованием первых трещин проходит через центр тяжести (y_t) поперечного сечения.

Для определения момента появления первых трещин в ригеле по деформационной модели (M_{crc}^{defor}) учитывается сопротивление усилий всего нормального сечения бетона, т. е. сопротивление бетона растянутой и сжатой зон. Формула для M_{crc}^{defor} имеет следующий вид:

$$M_{crc}^{defor} = \sum |\sigma_{bi}| A_{bi} \cdot y'_{bi}, \quad (1)$$

где $|\sigma_{bi}| = \varepsilon_{bi} \cdot E'_{bi}$ – величина средних напряжений в i -м слое нормального сечения бетона по модулю при $\varepsilon_{bt, extreme} = \varepsilon_{bt1, red} = 8 \cdot 10^{-5}$, $\sigma_{b, extreme} = R_{bt, ser}$ в зависимости от y_t , и может быть определена геометрически по признакам «подобия треугольников» (см. рис. 3, табл. 3); $A_{bi} = b_{bi} \cdot \Delta_{bi}$ – площадь сечения i -го слоя нормального сечения бетона (см. табл. 2); $y'_{bi} = y_{0j} - y_{bi}$ – расстояние от нейтральной линии до центра тяжести i -го слоя бетона (см. табл. 2).

1.2. Деформационный метод определения расстояния между смежными трещинами

По деформационному методу базовое расстояние между смежными трещинами определяется с учетом площади растянутой зоны сечения в предельном состоянии по формуле

$$l_s^{defor} = 0,5 \frac{A_{bt}^{defor}}{A_s} d_s. \quad (2)$$

Площадь растянутой зоны в предельном состоянии равна

$$A_{bt}^{defor} = b \cdot y_t,$$

где A_s , d_s – площадь сечения и диаметр арматуры соответственно; b – ширина элемента.

1.3. Деформационный метод определения ширины раскрытия трещин (a_{crc}^{defor})

Определение a_{crc}^{defor} в зависимости от напряжений в растянутой арматуре – по формуле

$$a_{crc}^{defor} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s^{defor} \frac{\sigma_s^{defor}}{E_s} l_s^{defor}, \quad (3)$$

где ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; $\varphi_1 = 1$ – при не продолжительном действии нагрузки [5, 6]; $\varphi_2 = 0,5$ – для арматуры периодического профиля [5, 6]; $\varphi_3 = 1$ – для элементов изгибаемых [5, 6]; σ_s^{defor} – напряжение в растянутой арматуре при достижении максимальной величины кривизны элемента из [1, табл. 2].

Коэффициент ψ_s определяется с учетом M_{crc}^{defor} и несущей способности элемента M^{defor} , полученного из работы [1] по формуле

$$\psi_s^{defor} = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}^{defor}}{M^{defor}}. \quad (4)$$

1.4. Деформационный метод определения прогиба элемента

Для определения кривизны изгибаемого железобетонного элемента используется общеизвестная формула (5), при этом в ней учитываются расчетные параметры из деформационной модели в [1], т. е. прочность M^{defor} и жесткость $E'_b \cdot I_{red}$ элемента, выраженные с учетом модулей деформаций:

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{max}^{defor} = \frac{M^{defor}}{E'_b \cdot I_{red}}, \quad (5)$$

где M^{defor} – деформационная прочность элемента; E'_b – модуль деформаций из [1, табл. 2].

Прогиб элемента по деформационному методу определяется по формуле

$$f^{defor} = \frac{5}{48} l^2 \left(\frac{1}{r} \right)_{max}^{defor}. \quad (6)$$

2. Результаты и обсуждение

Типовой ригель РДП 4.56-90 имеет следующие расчетные и геометрические характеристики. Класс бетона В40: $\alpha = \frac{2 \cdot 10^5}{36000} = 5,55$, $R_{bt,n} = R_{bt,ser} = 2,1$ МПа, $E_b = 36000$ МПа. Продольная арматура класса А400 (А-III): $R_{s,n} = R_{s,ser} = 400$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа.

На рис. 1 представлены армирование и поперечное сечение ригеля с геометрическими размерами $b \times h \times l = 570 \times 450 \times 54\,000$ мм, на рис. 2 – разбивка поперечного сечения на малые участки (слои), где имеются тринадцать слоев, нумерация начинается с нижней зоны поперечного сечения.

Из работы [1] принимаются следующие расчетные параметры, их численные значения приводятся на рис. 2 и табл. 1, 2:

Δ_{bi} , y_{bi} , b_{bi} , A_{bi} – высота i -го слоя, расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести i -го слоя, ширина и площадь i -го слоя бетона соответственно;

y_{si} , A_{si} , E_s , E'_{si} – расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести i -го слоя, площадь, модуль упругости и модуль деформаций i -й арматуры соответственно;

$y_t = y_{0,j} = y_{0,1} = 18,01$ см – положение нейтральной линии в сечении в упругой стадии работы, обозначаемое как «N.L.»;

$y_{0,j} = y_{0,11} = 21,09$ см – положение нейтральной линии «N.L.» в сечении в предельной стадии работы элемента;

y'_{bi} – расстояние от нейтральной линии «N.L.» до центра тяжести i -го слоя (плечо пары сил);

$\varepsilon_{s2} = 2,07 \cdot 10^{-3}$ и $\sigma_{s2} = 355$ МПа – максимальные деформации и напряжения в арматуре растянутой зоны, соответствующие напряженно-деформированному состоянию, при котором достигается максимальная величина кривизны элемента;

$M^n = 430,0$ кН·м; $M^{defor} = 424,5$ кН·м – нормативная и деформационная прочности ригеля соответственно.

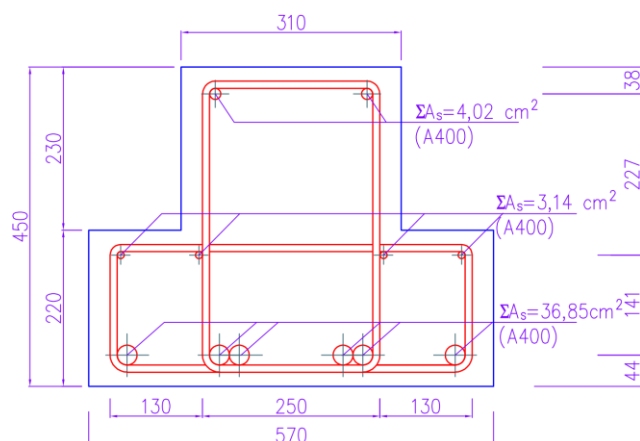


Рис. 1. Поперечное сечение и армирование ригеля
Fig. 1. Cross-section and reinforcement of the beam

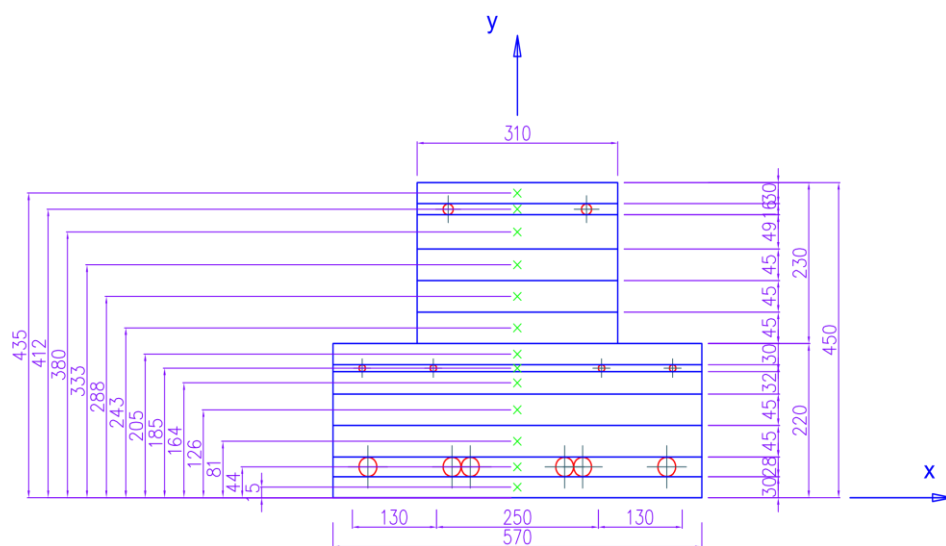


Рис. 2. Разбивка поперечного сечения [1]
Fig. 2. Cross-section breakdown

В табл. 1 представлены расчетные параметры, которые были определены в работе [1].

Таблица 1

Расчетные параметры (программа Excel)

Table 1

Calculation parameters (Excel)

i	Δ_{bi}	y_{bi}	b_{bi}	A_{bi}	E'_{bi}	y_{si}	A_{si}	E'_{si}	y_{oj}	y'_{bi}	y'_{si}
	см			см ²	МПа	см	см ²	МПа	см		
1	3	1,5	57	171	3,06E+04	4,4	36,8	2,E+05	18,01	16,51	—
2	2,8	4,4	57	122,8	3,06E+04	—	—	—		13,61	13,61
3	4,5	8,05	57	256,5	3,06E+04	—	—	—		9,96	—
4	4,5	12,55	57	256,5	3,06E+04	—	—	—		5,46	—
5	3,2	16,4	57	182,4	3,06E+04	18,5	3,14	2,E+05		1,61	—
6	1	18,5	57	53,86	3,06E+04	—	—	—		—0,49	—
7	3	20,5	57	171	3,06E+04	—	—	—		—2,49	—
8	4,5	24,25	31	139,5	3,06E+04	—	—	—		—6,24	—
9	4,5	28,75	31	139,5	3,06E+04	—	—	—		—10,74	—
10	4,5	33,25	31	139,5	3,06E+04	—	—	—		—15,24	—
11	4,5	37,95	31	151,9	3,06E+04	41,2	4,02	2,E+05		—19,94	—
12	1,6	41,2	31	45,58	3,06E+04	—	—	—		—23,19	—23,19
13	3	43,5	31	93	3,06E+04	—	—	—		—25,49	—

Для расчета трещиностойкости и жесткости элемента в табл. 2 представлены необходимые численные значения расчетных параметров при 11-й итерации, вычисленные в работе [1].

Таблица 2

Расчетные параметры при 11-й итерации (программа Excel)

Table 2

Calculation parameters after 11 iterations (Excel)

i	A_{bi}	E'_{bi}	A_{si}	E'_{si}	y_{oj}	y'_{bi}	y'_{si}	$\frac{1}{r}$	ε_{bi}	σ_{bi}	ε_{si}	σ_{si}
	см ²	МПа	см ²	МПа	см			см ⁻¹	—	МПа	—	МПа
1	171	0,00E+00	—	—	21,09	19,6	—	1,24E-04	2,43E-03	0,0	—	—
2	122,8	0,00E+00	36,8	2E+05		16,7	16,69		2,07E-03	0,0	2,07E-03	355
3	256,5	0,00E+00	—	—		13,0	—		1,61E-03	0,0	—	—
4	256,5	0,00E+00	—	—		8,5	—		1,06E-03	0,0	—	—
5	182,4	0,00E+00	3,14	2E+05		4,7	—		5,81E-04	0,0	3,21E-04	64,17
6	53,86	0,00E+00	—	—		2,6	2,59		3,21E-04	0,0	—	—
7	171	1,75E+04	—	—		0,6	—		7,32E-05	1,3	—	—
8	139,5	1,47E+04	—	—		—3,2	—		—3,91E-04	—5,7	—	—
9	139,5	1047E+04	—	—		—7,7	—		—9,48E-04	—13,9	—	—
10	139,5	1,47E+04	—	—		—12,2	—		—1,51E-03	—22,0	—	—
11	151,9	1,06E+04	4,02	2E+05		—16,9	—		—2,09E-03	—22,0	—2,49E-03	—355
12	45,58	8,92E+03	—	—		—20,1	—20,11		—2,49E-03	—22,0	—	—
13	93	8,01E+03	—	—		—22,4	—		—2,78E-03	—22,0	—	—

2.1. Деформационный момент образования трещин (M_{crc}^{defor})

Краевые деформация и напряжение растянутой зоны сечения при двухлинейной диаграмме деформирования бетона равны:

$$\varepsilon_{bt, extreme} = \varepsilon_{bt1, red} = 8 \cdot 10^{-5}, \quad \sigma_{b, extreme} = R_{bt, ser} = 2,1 \text{ МПа.}$$

На рис. 3 представлены средние напряжения в i -ом участке перед образованием трещин. С учетом известной расчетной величины центра тяжести поперечного сечения ($y_t = 18,01$ см) и на основе равенства количественных отношений сторон «подобных треугольников» определяются величины средних напряжений i -го слоя бетона нормального сечения.

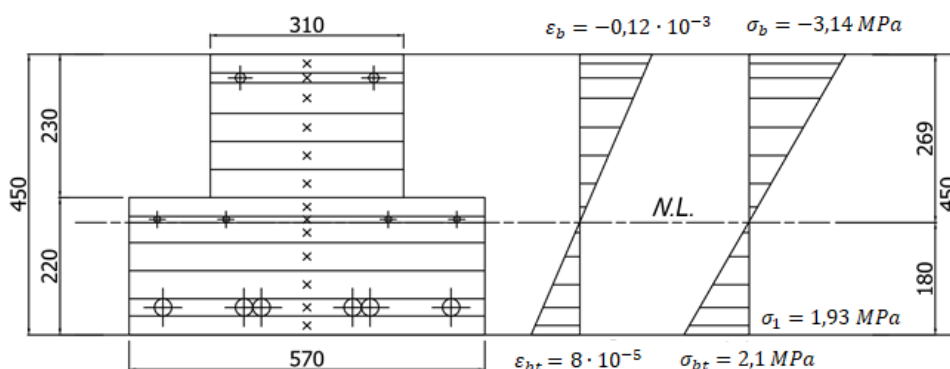


Рис. 3. Расчетная схема для определения средних значений напряжений перед образованием трещин [1]

Fig. 3. Calculation diagram for average stress values before crack formation [1]

Например, при $y_t = y_{01} = 18,01$ см и $y'_{b1} = y_{01} = 16,51$ см (см. табл. 1), согласно рис. 3, нейтральная линия (N.L.) проходит почти на границе между 5-м и 6-м слоем, и для первого слоя при $i = 1$ имеем следующие соотношения сторон и соответствующие средние напряжения:

$$\frac{2,1}{18,01} = \frac{x_1}{y'_{b1}} = \frac{x_1}{16,51} \Rightarrow x_1 = \sigma_1 = 1,93 \text{ МПа.}$$

По аналогии также определяются средние напряжения в остальных слоях нормального сечения элемента, они вычислены, и их численные значения представлены в табл. 3.

Численные значения расчетных параметров A_{bi} и y'_{bi} известны и представлены в табл. 1.

До появления трещин нормальное сечение ригеля работает под нагрузкой упруго, а в момент появления трещин эпюра напряжений в бетоне из треугольной формы переходит в криволинейную (прямоугольную).

В этой связи, чтобы учесть неупругие деформации в растянутом бетоне (нелинейность напряжений) при определении момента трещинообразования, так

же как при расчете по предельным состояниям [2, 3], суммарное усилие в формуле (1) и при $\frac{b_f}{b} = 1,84 < 2$ необходимо умножить на коэффициент $\gamma = 1,25$.

Таблица 3

Средние напряжения (программа Excel)

Table 3

Average stresses (Excel)

Номер слоев	Средние напряжения σ_i , МПа
1	1,93
2	1,587
3	1,161
4	0,637
5	0,188
6	-0,057
7	-0,29
8	-0,727
9	-1,252
10	-1,777
11	-2,325
12	-2,704
13	-2,972

Суммарное нормальное усилие, подсчитанное в программе Excel и равное $\sum \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot y'_{bi} = 35\,3716,3052$ кг·см, представлено в табл. 4.

Таблица 4

Определение суммарного нормального усилия (программа Excel)

Table 4

Total normal force (Excel)

σ_{bi} , кг/см ²	A_{bi} , см ²	y'_{bi} , см	$\sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot y'_{bi}$, кг·см
19,3	171	16,51	54 487,953
15,87	122,8	13,61	26 523,65796
11,61	256,5	9,96	29 660,5314
6,37	256,5	5,46	8921,1213
1,88	182,4	1,61	552,08832
0,57	53,86	0,49	15,043098
2,9	171	2,49	1234,791
7,27	139,5	6,24	6328,3896
12,52	139,5	10,74	18 757,8396
17,77	139,5	15,24	37 778,6646
23,25	151,9	19,94	70 421,5995
27,04	45,58	23,19	28 581,28541
29,72	93	25,49	70 453,3404
—	—	Σ:	353 716,3052

Деформационный момент трещинообразования с учетом пластических деформаций определяется по формуле (1):

$$M_{crc}^{defor} = \gamma \sum |\sigma_{bi}| A_{bi} \cdot y'_{bi} = 1,25 \cdot 35,372 = 44,215 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

2.2. Нормативный момент образования трещин (M_{crc}^n)

Нормативный момент образования трещин с учетом неупругих деформаций растянутого бетона определяют согласно [2, 3] по формуле

$$M_{crc}^n = 1,3 R_{bt,ser} \cdot W,$$

где $W = \frac{I_{red}}{y_t^n}$ – момент сопротивления сечения; $I_{red} = I_b + I_s \cdot \alpha + I'_s \cdot \alpha$ – при-

веденный момент сопротивления; $y_t^n = \frac{S_{red}}{A_{red}}$ – нормативная высота растянутой

зоны сечения ригеля; $S_{red} = \frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot A_s \cdot a$ – приведенный статический мо-

мент; $A_{red} = b \cdot h + \alpha \cdot A_s$ – приведенная площадь сечения.

Приведенный момент инерции:

$$I_{red} = \frac{30 \cdot 45^3}{12} + \frac{27 \cdot 22^3}{12} + 5,55 \times \\ \times (36,85 \cdot 13,61^2 + 3,14 \cdot 0,49^2 + 4,02 \cdot 23,19^2) = 301\,656,2 \text{ см}^4.$$

Приведенный статический момент:

$$S_{red} = \frac{310 \cdot 450^2}{2} + 5,55 \cdot 3685 \cdot 50 = 32\,410\,087,5 \text{ мм}^3. \\ A_{red} = 310 \cdot 450 + 5,55 \cdot 3685,0 = 159\,951,7 \text{ мм}^2.$$

Тогда $y_t^n = \frac{32410087,5}{159951,7} = 202,6 \text{ мм}.$

Момент сопротивления равен

$$W = \frac{301656,2}{20,26} = 14\,889,2 \text{ см}^3.$$

Нормативный момент образования трещин найдем по формуле

$$M_{crc}^n = 1,3 \cdot 21,4 \cdot 14889,2 = 414\,217,544 \text{ кг}\cdot\text{см} = 41,422 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Определение процентного расхождения методов по трещинообразованию:

$$\delta = \frac{M_{crc}^{defor} - M_{crc}^n}{M_{crc}^n} 100 \% = \frac{44,215 - 41,422}{41,422} 100 \% = 6,74 \%.$$

2.3. Деформационный метод определения расстояния между смежными трещинами

По деформационному методу базовое расстояние между смежными трещинами определяется с учетом площади растянутой зоны сечения в предель-

ном состоянии, полученной из [1] при $y_t = y_{011} = 21,09$ см (см. табл. 2) по формуле (2).

Площадь растянутой зоны в предельном состоянии равна

$$A_{bt}^{defor} = b \cdot y_t = 310 \cdot 210,9 = 65\,379 \text{ мм}^2.$$

Расстояние между смежными трещинами при $A_s = 3685,0 \text{ мм}^2$:

$$l_s^{defor} = 0,5 \frac{65379,0}{3685} 28 = 248,4 \text{ мм}.$$

Для сравнения вычисляется нормативное базовое расстояние между смежными трещинами.

Нормативное базовое расстояние между трещинами. Нормативное базовое расстояние между трещинами определяют согласно [2, 3].

С учетом ранее вычисленного параметра $y_t^n = 202,6$ мм и $b = 310$ мм определяем нормативную площадь растянутой зоны:

$$A_{bt}^n = 310 \cdot 202,6 = 62\,813,5 \text{ мм}^2.$$

Нормативное расстояние между смежными трещинами l_s^n определяется по формуле

$$l_s^n = 0,5 \frac{A_{bt}^n}{A_s} 28 = 0,5 \frac{62813,5}{3685,0} 28 = 238,6 \text{ мм}.$$

Отклонение методов:

$$\delta = \frac{l_s^{defor} - l_s^n}{l_s^n} 100 \% = \frac{248,4 - 238,6}{238,6} 100 \% = 4,1 \%.$$

2.4. Деформационный метод определения ширины раскрытия трещин (a_{crc}^{defor})

Определение a_{crc}^{defor} по формуле (3) в зависимости от напряжений в растянутой арматуре при достижении максимальной величины кривизны элемента, вычисленной в работе [1].

Коэффициент ψ_s определяется по формуле (4) с учетом $M_{crc}^{defor} = 44,215$ кН·м и несущей способности элемента $M^{defor} = 424,5$ кН·м, полученного из работы [1] по формуле

$$\psi_s^{defor} = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}^{defor}}{M^{defor}} = 1 - 0,8 \frac{44,215}{424,5} = 0,916.$$

Согласно источникам [5, 6], расчетные коэффициенты принимаются равными:

$\phi_1 = 1$ – при непродолжительном действии нагрузки;

$\phi_2 = 0,5$ – для арматуры периодического профиля;

$\phi_3 = 1$ – для элементов изгибаемых.

Напряжение в арматуре равно $\sigma_s^{defor} = 355$ МПа [1, табл. 2].

a_{crc}^{defor} в зависимости от напряжений по формуле (3):

$$a_{crc}^{defor} = 1 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,916 \frac{355}{2 \cdot 10^5} 248,4 = 0,20 < [a_{crc}] = 0,3 \text{ мм} - \text{условие выпол-}$$

няется, следовательно, деформационная трещиностойкость ригеля обеспечена.

Нормативная ширина раскрытия трещин (a_{crc}^n). Нормативная ширина раскрытия трещин определяется [2, 3] по формуле

$$a_{crc}^n = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s.$$

Определение нормативных расчетных параметров по [2, 3]:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{M_{crc}}{M} = 1 - 0,8 \frac{41,422}{430,0} = 0,923 - \text{коэффициент, учитывающий не-}$$

равномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры

между трещинами по нормативу; $\sigma_s = \frac{M^n}{z_s \cdot A_s}$ – нормативное напряжение в рас-

тянутой арматуре;

$$z_s = \zeta \cdot h_0;$$

$$\mu_s \cdot \alpha_{s1} = \frac{A_s}{b \cdot h_0} \frac{E_s}{E_{b, red}};$$

$$\mu_s \cdot \alpha_{s1} = \frac{36,85}{31 \cdot 40,6} \frac{2 \cdot 10^6}{193333,3} = 0,3.$$

$$\text{При } \mu_s \cdot \alpha_{s1} = 0,3, \quad \delta = \frac{2 \cdot a}{h_0} = 40,6 \frac{2 \cdot 3,8}{40,6} = 0,187 \leq 0,2 \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{\alpha_{s1} \cdot A_s}{b \cdot h_0} =$$

$$= \frac{10,3 \cdot 4,02}{31 \cdot 40,6} = 0,032 \text{ в зависимости от чертежа 4.3 из [2, 3] определяем}$$

коэффициент $\zeta = 0,82$.

Тогда плечо пары сил равно $z_s = 0,82 \cdot 406,6 = 332,9$ мм.

$$\sigma_s = \frac{430 \cdot 10^4}{33,29 \cdot 36,85} = 3505 \cdot 0,1 = 350,5 \text{ МПа.}$$

Нормативная ширина раскрытия трещин равна $a_{crc}^n = 1 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,923 \times$
 $\times \frac{350,5}{2 \cdot 10^5} 238,6 = 0,193 < [a_{crc}] = 0,3 \text{ мм} - \text{условие выполняется, следовательно,}$

нормативная трещиностойкость ригеля обеспечена.

$$\delta = \frac{a_{crc}^{defor} - a_{crc}^n}{a_{crc}^n} 100 \% = \frac{0,2 - 0,193}{0,193} 100 \% = 4,6 \%.$$

2.5. Деформационный метод определения прогиба элемента

Для определения кривизны изгибаемого железобетонного элемента используется формула (5):

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\max}^{\text{defor}} = \frac{M^{\text{defor}}}{E_b' \cdot I_{\text{red}}} = \frac{424,5 \cdot 10^4}{175000 \cdot 301656,2} = 0,804 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см}},$$

где $M^{\text{defor}} = 425,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$ – прочность элемента;

$E_b' = 17\,500 \text{ МПа}$ (см. табл. 2) – модуль деформаций, полученный на 11-й итерации в работе [1]; ранее вычисленный $I_{\text{red}} = 301\,656,2 \text{ см}^4$.

Прогиб элемента по деформационному методу по формуле (6):

$$f^{\text{defor}} = \frac{5}{48} 540^2 \cdot 0,804 \cdot 10^{-4} = 2,44 < [f] = \frac{1}{200} l = \frac{1}{200} 540 = 2,7 \text{ см} - \text{усло-}$$

вие выполняется, следовательно, деформационная жесткость ригеля обеспечена.

Нормативный прогиб элемента. Приведем ранее вычисленные прочность и приведенный момент инерции ригеля: $M^n = 430,0 \text{ кН} \cdot \text{м}$; $I_{\text{red}} = 301\,656,2 \text{ см}^4$.

Нормативная кривизна равна

$$\left(\frac{1}{r}\right)^n = \frac{M^n}{0,5 E_b' \cdot I_{\text{red}}} = \frac{430 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 360000 \cdot 301656,2} = 0,792 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см}}.$$

Нормативный прогиб элемента:

$$f^n = S l^2 \left(\frac{1}{r}\right)_{\max}^n = \frac{5}{48} 540^2 \cdot 0,792 \cdot 10^{-4} = 2,4 < f_{\text{ult}} = \frac{1}{200} l = \frac{1}{200} 540 = 2,7 \text{ см} -$$

условие выполняется, следовательно, нормативная жесткость ригеля обеспечена.

$$\delta = \frac{f^{\text{defor}} - f^n}{f^n} 100 \% = \frac{2,44 - 2,4}{2,4} 100 \% = 1,6 \ \%.$$

В табл. 5 представлен сравнительный анализ расчетных контролируемых параметров методов, где подсчитаны расхождения в процентах.

Таблица 5

Сравнение расчетных параметров

Table 5

Calculation parameters

Контролируемый параметр	Метод расчета			δ, %
	Деформационный		Нормативный по предельным состояниям	
M_{crc}	44,215 кНм	по формуле (1)	41,422 кНм	6,74
L_{crc}	248,8 мм	по формуле (2)	238,6 мм	4,1
a_{crc}	0,2 мм	по формуле (3)	0,193 мм	4,6
f	2,44 см	по формуле (6)	2,4 см	1,6

Выводы

1. Момент трещинообразования по деформационной модели M_{crc}^{defor} определяется по формуле (1) суммированием нормальных усилий, возникающих в каждом i -м слое сечения, выраженных через напряжения в бетоне перед появлением первых трещин. При этом эпюра напряжений растянутой и сжатой зон принята треугольной формы с максимальной ординатой растянутой зоны, равной $\sigma_{bt} = R_{bt,ser} = 2,1$ МПа, а наличие неупругих деформаций учитывается с коэффициентом $\gamma = 1,25$, принимаемым как для расчета по предельным состояниям [5, 6].

2. Базовое расстояние между смежными трещинами по деформационной модели l_s^{defor} определяется по формуле (2) с учетом площади растянутой зоны A_{bt}^{defor} нормального сечения в предельном состоянии элемента при высоте растянутой зоны, равной $y_t = y_{011} = 21,09$ см, полученной из расчета прочности по деформационной модели [1].

3. Ширина раскрытия нормальных трещин a_{crc}^{defor} определяется по формуле (3) с учетом расчетных параметров w_s^{defor} , σ_s^{defor} , l_s^{defor} , вычисленных по деформационной модели.

4. Прогиб элемента по деформационной модели f^{defor} определяется по формуле (6) с учетом максимальной кривизны $\left(\frac{1}{r}\right)_{max}^{defor}$ по формуле (5) и жесткости сечения при модуле деформации бетона растянутой зоны, равной $E'_b = 17\,500$ МПа и M^{defor} .

5. Полученные результаты расчетов по трещиностойкости и жесткости по формулам (1) – (6), представленные в табл. 5, показывают незначительные расхождения контролируемых параметров с погрешностью $\delta < 7\%$, что подтверждает адекватность деформационной модели расчета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Phan V.P. Practical calculation of flexible members with the use of non-linear deformation model as exemplified by typical girder RGD 4.56-90 // Architecture and Engineering. 2018. V. 3. № 3. P. 29–41. DOI: 10.23968/2500-0055-2018-3-3-29-41
2. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Vedernikova A.A. Calculation of bending of steel-fiber-reinforced concrete members by a nonlinear deformation model with the use of iteration procedures // Mechanics of Composite Materials. 2018. V. 54. № 3. P. 379–394.
3. Опбул Э.К., Дмитриев Д.А., Ведерникова А.А. Нелинейно-итерационный расчет прочности сталефиброжелезобетонных элементов с использованием опытных диаграмм деформирования материалов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 79–91.
4. Опбул Э.К., Калдар-оол А.Б., Хюи Л.К. Деформационная модель прочности изгибаемого элемента в среде Matlab // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 24 (4). С. 110–129. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-110-129
5. СП 63.13330.2018 (20.12.2021). Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003 (с изменениями № 1, 2). Москва : Минстрой России, 2019. 119 с.

6. *Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения* (к СП 52-101-2003). Москва : ОАО ЦРИИ-Промзданий, 2005. 166 с.
7. *Байков В.Н., Сигалов Э.Е.* Железобетонные конструкции. 4-е изд., перераб. Москва : Стройиздат, 1985. 728 с.
8. *Маилян Р.Л., Маилян Д.Р., Веселев Ю.А.* Строительные конструкции. 2-е изд. Ростов-на-Дону : Феникс, 2005. 880 с.
9. *Цай Т.Н.* Строительные конструкции. Железобетонные конструкции. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2021. 464 с.
10. *Габрусенко В.В., Беккер В.А.* Каменные и железобетонные конструкции одноэтажных зданий. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2021. 220 с.
11. *Улицкий И.И., Ривкин С.А.* Железобетонные конструкции. Расчет и конструирование. Москва : Изд-во RUGRAM, 2022. 400 с.
12. *Бондаренко В.М., Римшин В.И.* Примеры расчета железобетонных и каменных конструкций. Москва : Высшая школа, 2006. 504 с.
13. *Michal D., Jacek S.* Design Aspects of the Safe Structuring of Reinforcement in Reinforced Concrete Bending Beams // *Procedia Engineering*. 2017. P. 211–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
14. *Herranz J.P., Maria H.S., Gutiérrez S., Riddell R.* Optimal Strut-and-tie models using full homogenization optimization method // *ACI Structural Journal*. 2012. DOI: 10.14359/51684038
15. *Garstecki A., Glema A., Ścigallo J.* Optimal design of reinforced concrete beams and frames. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*. 1996. V. 3 (3). P. 223–231.
16. *Szeptyński P.* Comparison and experimental verification of simplified one-dimensional linear elastic models of multilayer sandwich beams // *Composite Structures*. 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112088
17. *Gao D.Y., Gu Z., Wu C.* Bending Behavior and Deflection Prediction of High-Strength SFRC Beams under Fatigue Loading // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.017
18. *Wu Z., Shi C., He W., Wu L.* Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028
19. *Yoo D.Y., Banthia N., Yoon Y.S.* Impact resistance of reinforced ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers // *ACI Structural Journal*. 2017. DOI: 10.14359/51689430
20. *Gali S., Subramaniam K.V.L.* Investigation of the dilatant behavior of cracks in the shear response of steel fiber reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2017. P. 832–842. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.050
21. *Li Q., Huang B., Xu S., Zhou B., Yu R.C.* Compressive fatigue damage and failure mechanism of fiber reinforced cementitious material with high ductility // *Cement and Concrete Research*. 2016. № 90 (4). P. 174–183. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.09.019
22. *Butean C., Heghes B.* Cost Efficiency of a Two Layer Reinforced Concrete Beam // *Procedia Manufacturing*. 2020. P. 103–109. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.016
23. *Zhu H., Cheng S., Gao D., Neaz S.M., Li C.* Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars // *Construction and Building Materials*. 2018. P. 587–597. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.003
24. *Song A., Wan S., Jiang Z., Xu J.* Residual deflection analysis in negative moment regions of steel-concrete composite beams under fatigue loading // *Construction and Building Materials*. 2018. P. 50–60. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.075
25. *Fava G., Carvelli V., Pisani M.A.* Remarks on bond of GFRP rebars and concrete // *Composites Part B: Engineering*. 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.012
26. *Aulia T.B., Rinaldi.* Bending capacity analysis of high-strength reinforced concrete beams using environmentally friendly synthetic fiber composites // *Procedia Engineering*. 2015. P. 1121–1128. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.136
27. *Rabi M., Cashell K.A., Shamass R.* Flexural analysis and design of stainless steel reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2019. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109432
28. *Cramer S.D., Covino B.S., Bullard S.J., Holcomb G.R., Russell J.H., Nelson F.J., Laylor H.M., Soltesz S.M.* Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced con-

- crete coastal bridges // *Cement and Concrete Composites*. 2002. P. 101–117. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00031-2
29. Ulzurrun G.S.D., Zanuy C. Enhancement of impact performance of reinforced concrete beams without stirrups by adding steel fibers // *Construction and Building Materials*. 2017. P. 166–182. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.005
30. Peklov P.N., Kozminskaya O.V., Kukhareva A.S. About Dynamic Responses of Input Devices of Underground Structures of Transport Infrastructure // *Transportation Research Procedia* : Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. Krasnoyarsk, 2023. P. 410–416. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.055
31. Glowacki M., Kowalski R. An experimental approach to the estimation of stiffness changes in RC elements exposed to bending and high temperature // *Engineering Structures*. 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110720
32. Shirunov G.N., Matrosov A.V., Sarvilin D.A. A rectangular prism under own weight: comparison of the method of initial functions and the finite element method // *Stability and Control Processes: Proceedings of the 4th International Conference Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov*. Cham, 2022. P. 829–836. EDN: BZVZGZ
33. Ширунов Г.Н. Изгиб толстой плиты, усиленной слоем внешнего армирования, под действием собственного веса // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 2 (73). С. 54–61. EDN: WTDCGA
34. Briz E., Biezma M.V., Bastidas D.M. Stress corrosion cracking of new 2001 lean–duplex stainless steel reinforcements in chl:oride contained concrete pore solution: An electrochemical study // *Construction and Building Materials*. 2018. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.108
35. Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S.M., Elwany A., Bian L. Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel // *International Journal of Fatigue*. 2017. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.03.014
36. Hou Z., Chen S., Sun Q., Wei X., Lv W. Experimental research on fatigue characteristics of X12Cr13 stainless steel // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.070
37. Panfilov D.A., Pischulev A.A., Romanchikov V.V. The Methodology for Calculating Deflections of Statically Indeterminate Reinforced Concrete Beams (Based on Nonlinear Deformation Model) // *Procedia Engineering*. 2016. P. 531–536. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.183
38. Gilbert R.I. The serviceability limit states in reinforced concrete design // *Procedia Engineering*. 2011. P. 385–395. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.048

REFERENCES

1. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Phan V.P. Practical Calculation of Flexible Members with the Use of Non-Linear Deformation Model as Exemplified by Typical Girder RGD 4.56-90. *Architecture and Engineering*. 2018; 3 (3): 29–41. DOI: 10.23968/2500-0055-2018-3-3-29-41
2. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Vedernikova A.A. Calculation of Bending of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Members by a Nonlinear Deformation Model with the Use of Iteration Procedures. *Mechanics of Composite Materials*. 2018; 54 (3): 379–394.
3. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Vedernikova A.A. Nonlinear Iterative Calculation of Strength of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Elements using Experimental Material Deformation Diagrams. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017; 1 (60): 79–91. (In Russian)
4. Opbul E.K., Kaldar-Ool A-Kh.B., Le Kuang Khyui. Deformation Modeling of Bending Element Strength in MATLAB. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (4): 110–129. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-110-129 (In Russian)
5. Spesificacion 63.13330.2018 (20.12.2021). Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Updated edition of SNiP 52-01–2003. Moscow: Minstroj Rossii, 2019. 119 p. (In Russian)
6. Manual for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete without prestressing (to SP 52-101–2003). Moscow: OAO TsRIIPromzdanii, 2005. 166 p. (In Russian)
7. Baikov V.N., Sigalov E.E. Reinforced Concrete Structures. 4th edn. Moscow: Stroiizdat, 1985. 728 p. (In Russian)

8. Mailyan R.L., Mailyan D.R., Veselev Yu.A. Building Construction. 2nd edn. Rostov-on-Don: Feniks, 2005. 880 p. (In Russian)
9. Tsai T.N. Building Structures. Reinforced Concrete Structures. 3rd edn. Saint-Petersburg: Lan', 2021. 464 p. (In Russian)
10. Gabrusenko V.V., Bekker V.A. Stone and Reinforced Concrete Structures of Single-Story Buildings. Novosibirsk, 2021. 220 p. (In Russian)
11. Ulitskii I.I., Rivkin S.A. Reinforced Concrete Structures. Calculation and Design. Moscow: RUGRAM, 2022. 400 p. (In Russian)
12. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Examples of Calculations for Reinforced Concrete and Masonry Structures. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 504 p. (In Russian)
13. Michal D., Jacek Ś. Design Aspects of the Safe Structuring of Reinforcement in Reinforced Concrete Bending Beams. *Procedia Engineering*. 2017; 211–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
14. Herranz J.P., Maria H.S., Gutiérrez S., Riddell R. Optimal Strut-and-Tie Models using Full Homogenization Optimization Method. *ACI Structural Journal*. 2012. DOI: 10.14359/51684038
15. Garstecki A., Glema A., Ścigallo J. Optimal Design of Reinforced Concrete Beams and Frames. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*. 1996; 3 (3): 223–231.
16. Szeptyński P. Comparison and Experimental Verification of Simplified One-Dimensional Linear Elastic Models of Multilayer Sandwich Beams. *Composite Structures*. 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112088
17. Gao D.Y., Gu Z., Wu C. Bending Behavior and Deflection Prediction of High-Strength SFRC Beams under Fatigue Loading. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.017
18. Wu Z., Shi C., He W., Wu L. Effects of Steel Fiber Content and Shape on Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028
19. Yoo D.Y., Banthia N., Yoon Y.S. Impact Resistance of Reinforced Ultra-High-Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers. *ACI Structural Journal*. 2017. DOI: 10.14359/51689430
20. Gali S., Subramaniam K.V.L. Investigation of the Dilatant Behavior of Cracks in the Shear Response of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures*. 2017; 832–842. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.050
21. Li Q., Huang B., Xu S., Zhou B., Yu R.C. Compressive Fatigue Damage and Failure Mechanism of fiber Reinforced Cementitious Material with High Ductility. *Cement and Concrete Research*. 2016; 90 (4): 174–183. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.09.019
22. Butean C., Heghes B. Cost Efficiency of a Two Layer Reinforced Concrete Beam. *Procedia Manufacturing*. 2020; 103–109. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.016
23. Zhu H., Cheng S., Gao D., Neaz S.M., Li C. Flexural Behavior of Partially Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Construction and Building Materials*. 2018; 587–597. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.003
24. Song A., Wan S., Jiang Z., Xu J. Residual Deflection Analysis in Negative Moment Regions of Steel-Concrete Composite Beams under Fatigue Loading. *Construction and Building Materials*. 2018; 50–60. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.075
25. Fava G., Carvelli V., Pisani M.A. Remarks on Bond of GFRP Rebars and Concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.012
26. Aulia T.B., Rinaldi. Bending Capacity Analysis of High-Strength Reinforced Concrete Beams using Environmentally Friendly Synthetic Fiber Composites. *Procedia Engineering*. 2015; 1121–1128. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.136
27. Rabi M., Cashell K.A., Shamass R. Flexural Analysis and Design of Stainless Steel Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures*. 2019. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109432
28. Cramer S.D., Covino B.S., Bullard S.J., Holcomb G.R., Russell J.H., Nelson F.J., Laylor H.M., Soltesz S.M. Corrosion Prevention and Remediation Strategies for Reinforced Concrete Coastal Bridges. *Cement and Concrete Composites*. 2002; 101–117. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00031-2
29. Ulzurrun G.S.D., Zanuy C. Enhancement of Impact Performance of Reinforced Concrete Beams without Stirrups by Adding Steel Fibers. *Construction and Building Materials*. 2017; 166–182. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.005

30. Peklov P.N., Kozminskaya O.V., Kukhareva A.S. About Dynamic Responses of Input Devices of Underground Structures of Transport Infrastructure. In: *Proc. 13th Int. Conf. on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability*. Krasnoyarsk, 2023. Pp. 410–416. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.055
31. Glowacki M., Kowalski R. An Experimental Approach to the Estimation of Stiffness Changes in RC Elements Exposed to Bending and High Temperature. *Engineering Structures*. 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110720
32. Shirunov G.N., Matrosov A.V., Sarvilin D.A. A Rectangular Prism under Own Weight: Comparison of the Method of Initial Functions and the Finite Element Method. Stability and Control Processes. In: *Proc. 4th Int. Conf. to the Memory of Professor Vladimir Zubov*. Cham, 2022. Pp. 829–836. EDN: BZVZGZ
33. Shirunov G.N. Bending of Thick Slab Reinforced with External Reinforcement Layer under its Own Weight. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 2 (73); 54–61. EDN: WTDCGA (In Russian)
34. Briz E., Biezma M.V., Bastidas D.M. Stress Corrosion Cracking of New 2001 Lean–Duplex Stainless Steel Reinforcements in Chloride Contained Concrete Pore Solution: An Electrochemical Study. *Construction and Building Materials*. 2018; 1–8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.108
35. Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S.M., Elwany A., Bian L. Effects of Building Orientation and Heat Treatment on Fatigue Behavior of Selective Laser Melted 17-4 PH Stainless Steel. *International Journal of Fatigue*. 2017. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.03.014
36. Hou Z., Chen S., Sun Q., Wei X., Lv W. Experimental Research on Fatigue Characteristics of X12Cr13 Stainless Steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.070
37. Panfilov D.A., Pischulev A.A., Romanchkov V.V. The Methodology for Calculating Deflections of Statically Indeterminate Reinforced Concrete Beams (Based on Nonlinear Deformation Model). *Procedia Engineering*. 2016; 531–536. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.183
38. Gilbert R.I. The Serviceability Limit States in Reinforced Concrete Design. *Procedia Engineering*. 2011; 385–395. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.048

Сведения об авторах

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

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

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

Саая Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, Тувинский государственный университет, 667000, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, sedip@list.ru

Authors Details

Ehres K. Opbul, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia; Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Republic of Tyva, pgupsopbul@mail.ru

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

Anai-Khaak B. Kaldar-ool, PhD, A/Professor, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Republic of Tyva, oorzhaka-h@mail.ru

Svetlana S. Saaya, PhD, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Republic of Tyva, pgupsopbul@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 16.12.2025
Одобрена после рецензирования 26.01.2026
Принята к публикации 02.02.2026

Submitted for publication 16.12.2025
Approved after review 26.01.2026
Accepted for publication 02.02.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 169–180.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 169–180.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 534.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-169-180

EDN: NJZQCP

ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСЧЕТЕ НЕПОСТОЯННОГО ВО ВРЕМЕНИ ШУМА В ПОМЕЩЕНИИ

Александр Иванович Антонов¹, Владимир Иванович Леденев^{1,2},
Ирина Владимировна Матвеева²

¹Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,
г. Москва, Россия

²Тамбовский государственный технический университет,
г. Тамбов, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Одним из основных процессов, определяющих шумовой режим в производственных помещениях с импульсными источниками звука, является реверберация. При ее исследовании используются данные о коэффициентах звукопоглощения ограждений, в том числе и звукопоглощающих облицовок, применяемых для снижения импульсного шума. Известно, что коэффициенты звукопоглощения эффективных звукопоглощающих материалов облицовок могут существенно изменяться в пределах октавных полос частот. Поэтому рекомендуемое в нормативной литературе использование при расчетах среднеарифметических октавных коэффициентов звукопоглощения для таких материалов может приводить к значительным ошибкам при оценке протекающих в помещениях реверберационных процессов.

Цель. Установление на основе компьютерного моделирования реверберационных процессов в помещениях значений коэффициентов звукопоглощения эффективных звукопоглощающих материалов, обеспечивающих необходимую точность расчета в октавных полосах частот характеристик непостоянных во времени звуковых полей помещений.

Результаты. На основе предложенной компьютерной методики установлено, что в случае значительных изменений коэффициентов звукопоглощения в октавной полосе частот процесс затухания октавного уровня звука определяется скоростью снижения звука в третьоктавной полосе частот с минимальным средним коэффициентом звукопоглощения. Этот коэффициент и следует принимать при исследованиях реверберационных процессов в помещениях с эффективными звукопоглощающими облицовками.

Ключевые слова: реверберация звука, октавные уровни звука, коэффициент звукопоглощения, звукопоглощающие облицовки

Для цитирования: Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Выбор коэффициентов звукопоглощения акустически эффективных материалов при расчете непостоянного во времени шума в помещении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 169–180. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-169-180. EDN: NJZQCP

ORIGINAL ARTICLE

SELECTION OF SOUND ABSORPTION COEFFICIENTS OF ACOUSTICALLY EFFECTIVE MATERIALS IN CALCULATING TIME-VARIABLE NOISE IN A ROOM**Aleksandr I. Antonov¹, Vladimir I. Ledenev^{1,2}, Irina V. Matveeva²**¹ *Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia*² *Tambov State Technical University, Tambov, Russia*

Abstract. Reverberation is one of the main processes that determines noise in industrial premises with pulsed sound sources. Its study uses data on the sound absorption coefficients of fences, including acoustical lining used to reduce the pulse noise. It is known that the sound absorption coefficient of effective acoustical lining can vary significantly within the octave frequency bands. Therefore, it is recommended to use arithmetic mean octave sound absorption coefficients according to regulatory documents, otherwise, it can lead to significant errors in the assessment of reverberation processes occurring in rooms.

Purpose: Using computer modeling of reverberation processes in rooms, to measure the sound absorption coefficient of effective sound-absorbing materials, ensuring the calculation accuracy in octave frequency bands of time-variable noise in a room.

Research findings: Based on the proposed computer technique, it is found that in the case of significant changes in the sound absorption coefficient in the octave frequency band, the attenuation of the octave sound level is determined by the rate of sound decrease in the third-octave frequency band with a minimum average sound absorption coefficient. This coefficient should be taken into account when studying reverberation processes in rooms with acoustical lining.

Keywords: sound reverberation, octave sound levels, sound absorption coefficient, acoustical lining

For citation: Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Selection of Sound Absorption Coefficients of Acoustically Effective Materials in Calculating Time-Variable Noise in a Room. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2026; 28 (1): 169–180. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-169-180. EDN: NJZQCP

Введение

На многих промышленных предприятиях осуществляются технологические процессы, при выполнении которых в помещении образуется импульсный шумовой режим, оказывающий негативное воздействие на организм рабочих [1]. При его гигиенической оценке и разработке мероприятий по ограничению его воздействия на организм человека необходимо иметь сведения о ненормируемых в настоящее время показателях импульсного шума, а именно о максимальных и минимальных уровнях импульсов, об их соотношениях между собой при изменениях длительности импульсов, частоты их следования, а также о скорости затухания звуковой энергии в промежутках времени между импульсами [2, 3]. Для этого требуются данные о пространственно-временных характеристиках импульсного шума [4]. Получить их возможно при исследованиях реверберационных процессов, протекающих в помещениях с импульсными источниками звука.

В настоящее время имеются методы расчетов отраженных звуковых полей, на основе которых возможно моделировать реверберационные процессы

в помещениях и, соответственно, определять указанные выше ненормируемые показатели импульсного шума. К ним относятся: классический метод диффузного звукового поля [5], статистические энергетические методы, основанные на представлениях о квазидиффузном звуковом поле [6, 7], метод однородных дискретных цепей Маркова [8, 9], метод интегрального уравнения Куттруфа [10]. Во всех случаях при использовании перечисленных выше методов расчета необходимо иметь сведения о средних коэффициентах звукопоглощения материалов ограждений в исследуемых октавных полосах частот.

В п. 4.2. ГОСТ Р ЕН 12354-6-2012 «Акустика зданий. Методы расчета акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Часть 6. Звукопоглощение в закрытых пространствах»¹ указывается, что «исходные данные для расчетов в октавных полосах могут быть получены усреднением соответствующих третьоктавных значений». В ГОСТ 31705-2011 «Материалы звукопоглощающие, применяемые в зданиях. Оценка звукопоглощения»² также указано, что коэффициент звукопоглощения в октавной полосе частот следует определять как среднеарифметическое значение коэффициентов звукопоглощения в третьоктавных полосах частот, входящих в состав октавы. При этом в ГОСТ Р ЕН 12354-6-2012 отмечается, что для узкополосных звукопоглотителей использование средних третьоктавных значений в качестве исходных данных для расчетов в октавных полосах не всегда обеспечивает необходимую точность расчетов. Это замечание также справедливо и для звукопоглощающих конструкций, частотные коэффициенты звукопоглощения которых значительно изменяются в октавной полосе. Коэффициенты звукопоглощения (КЗП) современных эффективных звукопоглощающих облицовок могут изменяться в 2 и более раза в пределах октавы [11]. В этом случае при расчете непостоянных звуковых полей в октавной полосе частот с использованием среднеарифметических третьоктавных значений КЗП погрешность может достигать более десяти децибел.

В статье на основе результатов компьютерного моделирования процессов реверберации разработаны предложения по выбору КЗП, обеспечивающих необходимую точность при расчете в октавных полосах частот непостоянных во времени звуковых полей помещений и исследованиях в них процессов реверберации.

Методика исследования процессов реверберации при изменяющихся в октаве величинах КЗП

Согласно статистической теории диффузного звукового поля в соразмерных помещениях процессы реверберации описываются выражениями Сэбина или Эйринга [5]. В данном случае для расчета процесса затухания звуковой энергии после отключения источника звука будет использоваться более простое выражение Сэбина, имеющее вид

¹ ГОСТ Р ЕН 12354-6-2012. Акустика зданий. Методы расчета акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Часть 6. Звукопоглощение в закрытых пространствах: нац. стандарт Российской Федерации. Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 20 с.

² ГОСТ 31705-2011. Материалы звукопоглощающие, применяемые в зданиях. Оценка звукопоглощения: нац. стандарт Российской Федерации. Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 8 с.

$$\varepsilon_t = \frac{4W(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}cS} \exp(-\bar{\alpha}ct / \bar{l}), \quad (1)$$

где W , $\bar{\alpha}$ – общая акустическая мощность источника шума и средний КЗП ограждений в октавной полосе частот; c – скорость звука в воздухе; S – площадь ограждающих поверхностей помещения; t – время после отключения источника звука; $\bar{l}$ – средняя длина свободного пробега звука в помещении.

Исследования показывают, что полученные на основе формулы Сэбина закономерности могут быть применимы и для расчетов с использованием выражения Эйринга.

С учетом зависимости от частоты звука величин акустической мощности источника звука W_x и КЗП ограждений α_x вместо выражения (1) при анализе следует использовать более точное уравнение

$$\varepsilon_t = \int_0^1 \frac{4W_x(1-\alpha_x)}{\alpha_x cS} \exp(-\alpha_x ct / \bar{l}) dx. \quad (2)$$

В этом случае для интегрирования по октавному частотному диапазону использована безразмерная переменная $x \in \{0-1\}$. Ее применение позволяет перейти от логарифмической шкалы абсцисс к линейной шкале и упростить вычисления. Величина переменной x связана с частотой звука f выражением

$$f = f_n + (f_v + f_n)x \text{ при } x \in \{0, 1\}, \quad (3)$$

где f_v , f_n – верхняя и нижняя границы частотного диапазона.

В случае, когда акустическая мощность источника в пределах октавной полосы может быть принята постоянной, величину W_x в (2) можно вынести за знак интеграла.

Сложный характер подынтегрального выражения и аппроксимационных функций для W_x и α_x приводит к громоздкому аналитическому решению уравнения (2). По этой причине расчет и анализ процесса реверберации с учетом частотных акустических характеристик выполнен численным методом на основе специально разработанной компьютерной программы.

Расчеты затухания звуковой энергии выполнены для условного помещения с площадью ограждающих поверхностей $S = 200 \text{ м}^2$, в котором все внутренние поверхности ограждений облицованы звукопоглощающим материалом. Для облицовки поверхностей условного помещения применен материал K-FONIK FIBER-P 30 толщиной 30 мм с наибольшим относительным изменением звукопоглощающих свойств в пределах октавной полосы со среднегеометрической частотой $f_{cp} = 500 \text{ Гц}$. Частотная характеристика этого материала в пределах октавы приведена на рис. 1.

Октавный коэффициент звукопоглощения в полосе с $f_{cp} = 500 \text{ Гц}$, рассчитываемый на основе арифметического усреднения частотной характеристики согласно ГОСТ 31705–2011, составляет $\bar{\alpha} = 0,268$. Правомомерность применения этого коэффициента при расчете непостоянных звуковых полей и, в частности, процесса реверберации показана на основе численного моделирования поля с использованием выражения (2). Акустическая мощность источника звука принята постоянной в пределах октавной полосы, и ее уровень равен 93,2 дБ.

Для численного расчета интеграла (2) октавный диапазон разбит на 21 частотную полосу с соответствующими значениями средних КЗП ограждений в каждой частотной полосе (рис. 1). Акустическая мощность источника шума равномерно распределена по 21 полосе частот, в каждой из которых уровень акустической мощности составил $L_W = 93,2 - 10\lg(21) = 80\text{дБ}$.

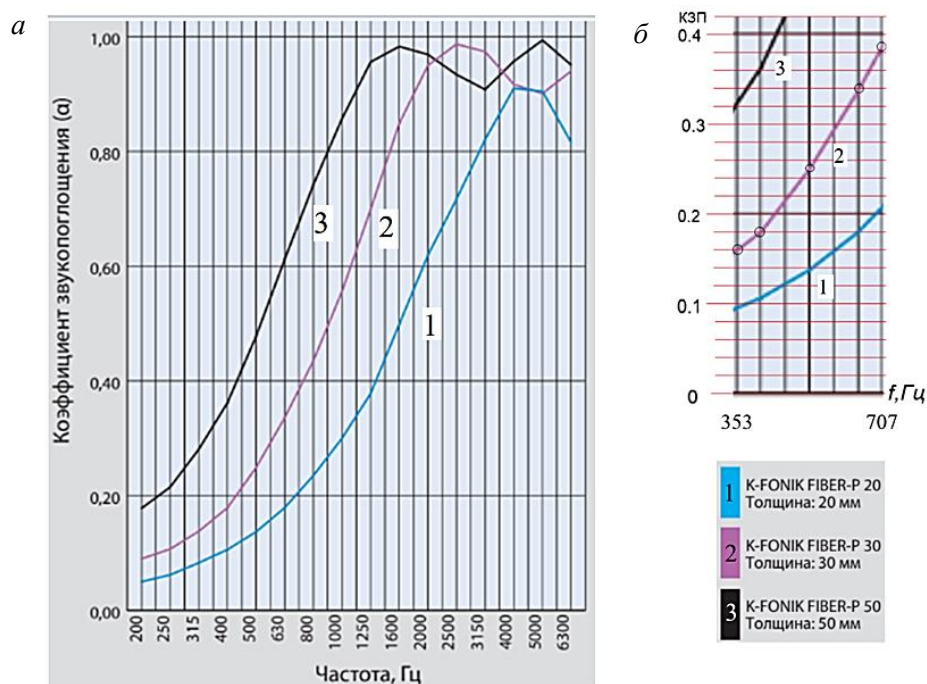


Рис. 1. Графики изменения коэффициента звукопоглощения материалов К-FONIK FIBER (а) и К-FONIK FIBER-P30 толщиной 30 мм в пределах октавной полосы со среднегеометрической частотой $f_{ср} = 500\text{ Гц}$ (б)

Fig. 1. Changes in the sound absorption coefficient of K-FONIK FIBER (a) and K-FONIK FIBER-P30 (b) materials 30 mm thick within an octave band with an average geometric frequency of 500 Hz

Результаты расчетов затухания уровней звуковой энергии в пределах частотной полосы анализа приведены на рис. 2. На графике пунктирной линией показано рассчитанное затухание общей октавной звуковой энергии, цветными линиями отмечены результаты затухания уровней звуковой энергии в различных поддиапазонах частот октавной полосы анализа. Поскольку в пределах октавной полосы КЗП материалы изменяются от 0,16 до 0,385 (рис. 1, б), то и скорость затухания уровней звукового давления на отдельных частотах изменяется в такой же степени. На графиках по оси X использованы относительные значения времени в долях от времени реверберации T октавного уровня, определенного по выражению Сэбина с учетом среднего КЗП, равного $\bar{\alpha} = 0,268$.

Согласно ГОСТ 31705–2011, затухание октавных и третьоктавных уровней следует рассчитывать на основе среднеарифметических значений КЗП, ко-

торые в данном случае в пределах каждой третьоктавной полосы составляют: $\bar{\alpha}_{1cp} = 0,194$; $\bar{\alpha}_{2cp} = 0,260$; $\bar{\alpha}_{3cp} = 0,349$.

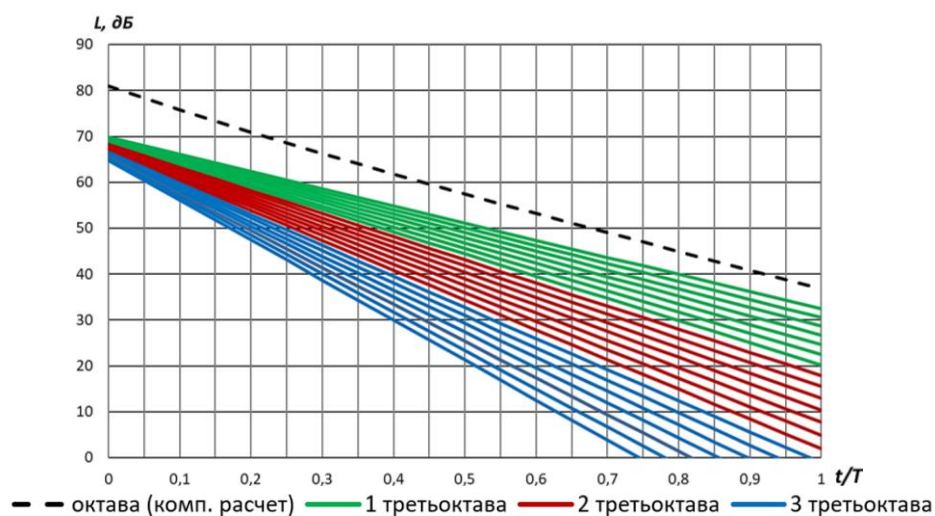


Рис. 2. Графики затухания энергии после отключения источника звука в пределах октавной полосы частот: T – время реверберации при среднем коэффициенте звукопоглощения $\bar{\alpha} = 0,268$

Fig. 2. Energy attenuation after switching off the sound source within the octave frequency band. $\bar{\alpha} = 0.268$ is the reverberation time at the average sound absorption coefficient

Линиями черного цвета на рис. 3 обозначено затухание уровней шума в третьоктавных полосах частот по средним третьоктавным значениям КЗП материала. Результаты расчетов показали, что фактическое затухание звуковой энергии в каждой из третьоктавных полос происходит медленнее (см. пунктирные линии и линии черного цвета на графиках рис. 3). Видно, что затухание звука в пределах каждой из частотных полос определяется главным образом затуханием составляющей энергии с минимальным КЗП, равным для используемого примера: $\alpha_{1m} = 0,170$; $\alpha_{2m} = 0,228$; $\alpha_{3m} = 0,307$.

Фактическое затухание звуковой энергии в третьоктавных полосах частот по результатам компьютерного расчета (пунктирные линии на графиках рис. 3) на начальном этапе происходит с более высокой скоростью, за счет чего скорость затухания энергии соответствует третьоктавным значениям КЗП большим, чем значения α_{im} , но меньшим, чем значения $\bar{\alpha}_{i_{cp}}$, т. е.:

$$\alpha_{1p} = 0,185; \alpha_{2p} = 0,248; \alpha_{3p} = 0,334.$$

Рассчитанные значения КЗП α_{ip} близки к величинам, рассчитываемым как $\alpha_{i_{cp}} = 0,5(\bar{\alpha}_{i_{cp}} + \alpha_{im})$. Их рекомендуется использовать в практических расчетах затухания третьоктавных уровней. Значения обеспечивают достаточную точность при расчетах и при этом легко вычисляются. В данном случае они равны: $\alpha_{1cp} = 0,182$; $\alpha_{2cp} = 0,244$; $\alpha_{3cp} = 0,328$.

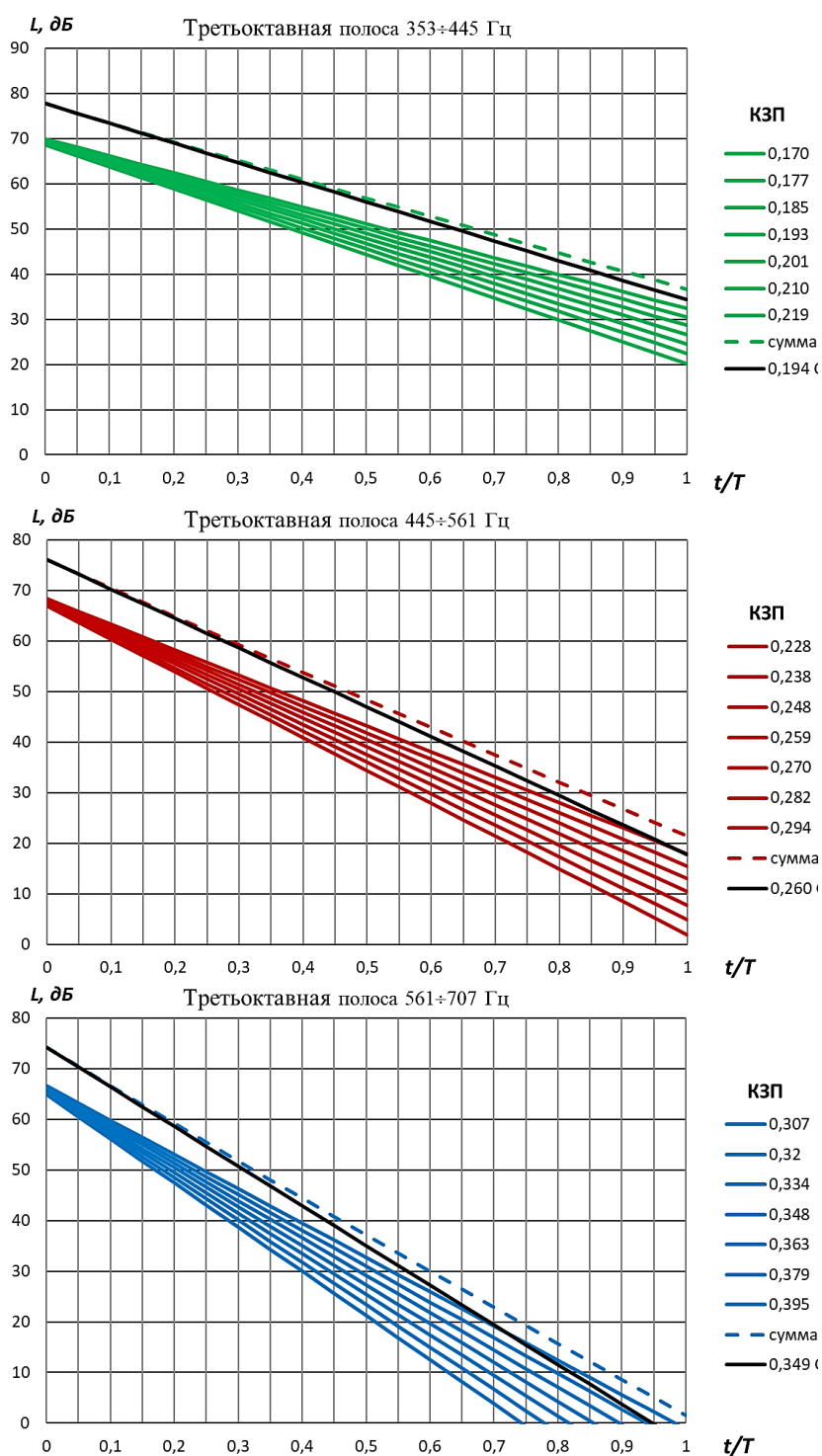


Рис. 3. Графики затухания звука в пределах третьооктавных полос
Fig. 3. Sound attenuation within one-third octave bands

Указанные различия в значениях α_{im}, α_{ip} и α_{icp} необходимо учитывать при обработке экспериментальных реверберограмм и, соответственно, при последующем использовании значений КЗП в расчетах.

На рис. 4 приведены графики затухания общей октавной звуковой энергии и энергий в третьоктавных полосах частот. Рассчитанный график затухания суммарной звуковой энергии с использованием среднего октавного коэффициента звукопоглощения, равного $\bar{\alpha} = 0,268$ (пунктирная линия красного цвета на рис. 4), значительно отличается от графика реверберации, полученного на основе компьютерного расчета. Расхождение в уровнях превышает 35 дБ. На основе графиков затухания октавной энергии (см. рис. 2) установлено, что скорость снижения звука пропорциональна коэффициенту звукопоглощения 0,19. Из сравнения графиков видно, что затухание октавной звуковой энергии в значительной степени определяется затуханием звука в третьоктавной полосе с минимальным средним коэффициентом звукопоглощения $\bar{\alpha}_{1cp} = 0,194$.

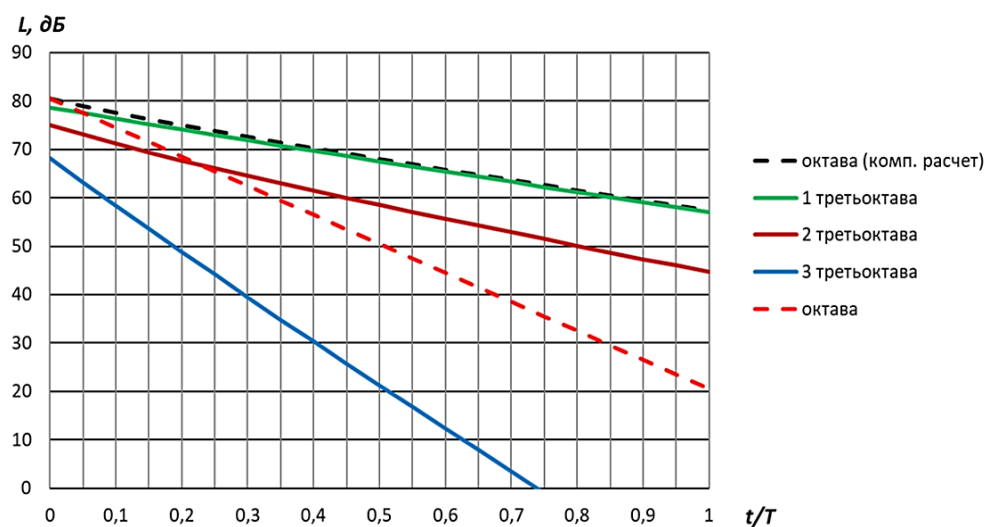


Рис. 4. Графики затухания звуковой энергии после отключения источника звука
Fig. 4. Sound energy attenuation after switching the sound source off

Аналогичные результаты были получены в других частотных полосах и для других звукопоглощающих материалов. По этой причине для практических расчетов затухания звука в пределах октавы рекомендуется в качестве октавного КЗП использовать среднее минимальное значение КЗП из третьоктавных полос, входящих в октаву. В данном случае $\alpha_{окт} = \bar{\alpha}_{1cp} = 0,194$.

Принципиально иной по сравнению с графиками затухания звуковой энергии имеют вид графики нарастания уровней звуковой энергии после включения источника звука.

Согласно закономерности Сэбина, нарастание октавной звуковой энергии происходит по выражению

$$\varepsilon_t = \frac{4W(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}cS} [1 - \exp(-\bar{\alpha}ct / \bar{l})] \quad (4)$$

или с учетом частотной характеристики звукопоглощения

$$\varepsilon_t = \frac{4W}{cS} \int_0^1 \frac{(1-\alpha_x)}{\alpha_x} [1 - \exp(-\alpha_x ct / \bar{l})] dx. \quad (5)$$

Как и в предыдущем случае, компьютерный расчет выполнен в октавной полосе с $f_{cp} = 500$ Гц, разделенный на 21 частотный диапазон. Расчетные графики приведены на рис. 5.

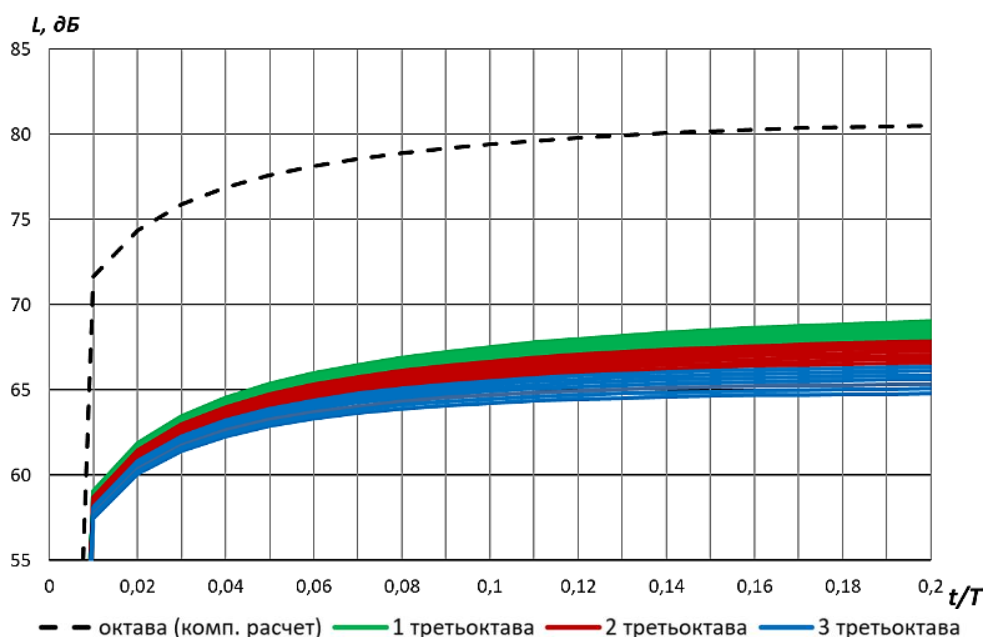


Рис. 5. Графики нарастания энергии после включения источника звука в пределах октавной полосы частот: T – время реверберации при среднем коэффициенте звукопоглощения $\bar{\alpha}$

Fig. 5. Energy increase after switching the sound source on within the octave frequency band. $\bar{\alpha}$ is the reverberation time at the average sound absorption coefficient

В отличие от процесса затухания звука (см. рис. 2), графики нарастания уровней отраженного звука почти совпадают, а скорость нарастания уровней звука практически не зависит от КЗП ограждения. Различия в графиках в основном определяются первым сомножителем в выражении (4) или величиной отраженной энергии в соответствующей частотной полосе.

Полученные результаты расчета показали, что процесс нарастания октавного уровня отраженного звука с достаточной точностью описывается выражением (4) с использованием арифметического усредненного среднего КЗП ограждения $\bar{\alpha} = 0,268$ (рис. 6).

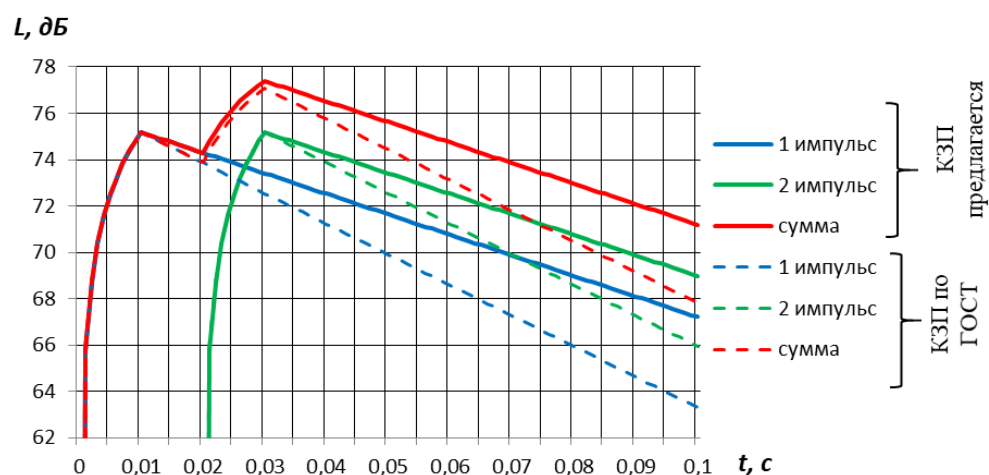


Рис. 6. Октавные уровни отраженного шума при действии двух импульсов
Fig. 6. Octave levels of reflected noise under the action of two pulses

На рис. 6 приведены рассчитанные октавные уровни отраженного звука при действии двух импульсов звука продолжительностью по 0,01 с. Расчеты выполнены для двух вариантов октавных КЗП ограждений: по требованиям государственного стандарта как среднеарифметических третьоктавных значений $\alpha_{\text{окт}} = \bar{\alpha} = 0,268$ и на основе рекомендаций, приведенных в данной статье, $\alpha_{\text{окт}} = \bar{\alpha}_1 = 0,194$.

Заключение

В целом выполненные исследования процессов нарастания и затухания непостоянного во времени звука показали, что процесс нарастания звука с достаточной точностью рассчитывается с использованием арифметически усредненного октавного коэффициента звукопоглощения. Затухание звука в значительной степени зависит от частотной характеристики звукопоглощения.

В случае больших изменений КЗП в пределах октавной полосы частот скорость затухания октавного уровня звука определяется скоростью снижения шума в тех третьоктавных полосах частот, в пределах которых коэффициент звукопоглощения минимален. При практических расчетах скорость снижения октавного шума следует принимать равной минимальной скорости снижения третьоктавного уровня из входящих в октаву третьоктавных полос.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суворов Г.А., Лихницкий А.М. Импульсный шум и его влияние на организм человека. Ленинград : Медицина, 1975. 207 с.
2. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Шубин И.Л. Методика расчета ненормируемых показателей импульсного шума, используемых при оценке шумового режима в производственных зданиях // Приволжский научный журнал. 2024. № 2 (70). С. 9–19.
3. Шубин И.Л., Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Расчеты ненормируемых параметров импульсного шума при выборе средств его снижения в производственных зданиях // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2024. № 5 (1077). С. 20–23.

4. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Соломатин Е.О. Методы оценки пространственно-временных изменений импульсного шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях // Приволжский научный журнал. 2021. № 4 (60). С. 9–16.
5. Маньковский В.С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. Москва : Искусство, 1966. 375 с.
6. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Шубин И.И. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях. Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 274 с.
7. Antonov A., Ledenev V., Shubin I. Numerical Method for Impulse Noise Calculation with Diffuse Sound Reflection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1079. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042044
8. Gerlach R., Meliert V. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. Theorie und erste experimentale berprufung // Acustica. 1975. V. 32. № 4. S. 217–227.
9. Головки А.В., Леденев В.И., Островская А.А. Методика оценки процесса реверберации в помещении на основе однородных дискретных цепей Маркова // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы VIII Международной научно-практической конференции. Тамбов : Издательство ИП Чеснокова А.В., 2021. С. 191–196.
10. Kuttruff H., Strassen T. Zur Abhandigkeit der Raumnachhalls von der Wand diffusitat und von Raumform // Acustica. 1980. V. 45. № 4. P. 246–255.
11. Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И., Сидорина А.В. Акустические и динамические характеристики эластомерных строительных материалов на основе NBR каучука // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 56–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-56-61

REFERENCES

1. Suvorov G.A., Lixniczkij A.M. Pulse Noise and its Effect on the Human Body. Leningrad: Medicina, 1975. 207 s. (In Russian)
2. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Methodology for Calculating Non-Normalized Pulse Noise Indicators used in Noise Assessment in Industrial Buildings. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2024; 2 (70): 9–19. (In Russian)
3. Shubin I.L., Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Calculations of Non-Normalized Parameters of Pulse Noise when Choosing Means to Reduce it in Industrial Buildings. *Byulleten stroitel'noi tekhniki*. 2024; 5 (1077): 20–23. (In Russian)
4. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Solomatin E.O. Estimation of Spatiotemporal Changes in Pulse Noise in Noise Protection of Industrial Buildings. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2021; 4 (60): 9–16. (In Russian)
5. Man'kovskii V.S. Acoustics of Studios and Halls for Sound Reproduction. Moscow: Iskustvo. 1966. 375 p. (In Russian)
6. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Calculation of Noise Protection of Industrial Buildings. Moscow, Berlin: Direkt-Media, 2020. 274 p. (In Russian)
7. Antonov A., Ledenev V., Shubin I. Numerical Method for Impulse Noise Calculation with Diffuse Sound Reflection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042044
8. Gerlach R., Meliert V. Der Nachhallvorgang als Markoffsche Kette. Theorie und erste experimentale berprufung. *Acustica*. 1975; 32 (4): 217–227.
9. Golovko A.V., Ledenev V.I., Ostrovskaya A.A. Evaluation of the reverberation process in a room based on homogeneous discrete Markov circuits. In: *Proc. 7th Sci. Conf. 'Stable Regional Development: Architecture, Construction, Transport'*. Tambov: Chesnokova A.V. 2021. Pp. 191–196. (In Russian)
10. Kuttruff H., Strassen T. Zur Abhandigkeit der Raumnachhalls von der Wand diffusitat und von Raumform. *Acustica*. 1980; 45 (4): 246–255.
11. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I., Sidorina A.V. Acoustic and Dynamic Characteristics of Elastomeric Building Materials based on NBR Rubber. *Stroitel'nye materialy*. 2019; (6): 56–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-56-61 (In Russian)

Сведения об авторах

Антонов Александр Иванович, докт. техн. наук, доцент, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, aiant58@yandex.ru

Леденев Владимир Иванович, докт. техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е; Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, ledvi46@yandex.ru

Матвеева Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е, times02@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr I. Antonov, DSc, A/Professor, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 21, Locomotive passage, 127238, Moscow, Russia, aiant58@yandex.ru

Vladimir I. Ledenev, DSc, Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, ledvi46@yandex.ru

Irina V. Matveeva, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, times02@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.

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 181–191.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 181–191.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-181-191

EDN: NLIBQI

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ХРАМА ВО ИМЯ НОВОМУЧЕНИКОВ И ИСПОВЕДНИКОВ РОССИЙСКИХ В ГОРОДЕ ТОМСКЕ

Иван Иванович Подшивалов

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

Аннотация. Актуальность исследования заключается в необходимости расчетного обоснования сложного конструктивного решения храма в виде пространственных распорных элементов покрытия из сводов и купола.

Цель работы состоит в получении и анализе напряженно-деформированного состояния свайного фундамента, надземных конструкций – плоских стен и перекрытия, пространственных сводов и купола покрытия.

Методы. Моделирование напряженно-деформированного состояния основания, свайного фундамента и надземных несущих конструкций здания храма выполнено в программно-вычислительном комплексе Ing+2021 MicroFe.

Результаты. Полученные значения и характер распределения продольных сил в сваях указывают на достаточно большую изгибную жесткость подвальной и надземной частей здания храма, когда наибольшие значения продольных сил возникают не во внутренних, а в угловых и контурных сваях. При этом расчетная величина вертикальных перемещений свай значительно меньше предельно допустимых значений.

В надземной части здания храма коэффициент использования кирпичной кладки стен по несущей способности меньше единицы, условие по первой группе предельных состояний выполняется.

В распорных конструкциях сводов и купола, а также в монолитных железобетонных поясах под ними подобранная расчетная арматура позволяет обеспечить их несущую способность и надежность.

Ключевые слова: храм, фундамент, стены, перекрытие, своды, купол, моделирование, расчет, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Подшивалов И.И. Расчетное обоснование надежности храма во имя Новомучеников и Исповедников Российских в городе Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 181–191. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-181-191. EDN: NLIBQI

ORIGINAL ARTICLE

**CALCULATED RELIABILITY JUSTIFICATION
OF THE CHURCH OF NEW MARTYRS AND CONFESSORS
OF RUSSIA IN TOMSK****Ivan I. Podshivalov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The work shows the need for a mathematical justification of the complex structural church design including the spatial blocking of the roof representing arches and a dome.

Purpose: The aim of the work is to obtain and analyze the stress-strain state of the pile foundation, above-ground structures such as flat walls and floors, spatial arches and dome roofing.

Methodology/approach: Modeling of the stress-strain state of the base, pile foundation, and above-ground load-bearing structures is performed in Ing+2021 MicroFe.

Value: The obtained results ensure the calculated reliability of the developed project documentation for the Church of New Martyrs and Confessors of Russia.

Research findings: The obtained values and longitudinal force distribution in piles indicate a sufficiently high flexural stiffness of the basement and above-ground parts of the church, when the highest longitudinal forces occur not in the internal piles, but in the corner and marginal piles. At the same time, the vertical pile displacement is significantly less than the maximum permissible value. In the building superstructure block, the operational factor of masonry is less than unity, and the condition for the ultimate limit state is satisfied. The proposed design reinforcement ensures the load-bearing capacity and reliability for arches, dome, and reinforced concrete belts beneath them

Keywords: church, foundation, wall, floor slabs, arch, dome, modeling, calculation, stress-strain state

For citation: Podshivalov I.I. Calculated Reliability Justification of the Church of New Martyrs and Confessors of Russia in Tomsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 181–191. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-181-191. EDN: NLIBQI

Форма покрытия храмов в виде сводов и куполов носит в культовом зодчестве символический смысл. На протяжении многих веков в культовом строительстве применялись каменные конструкции перекрытий и покрытия в виде цилиндрических и сферических сводов [1]. Строительство храмов на современном этапе осуществляется с применением каменной кладки в стенах и железобетона в перекрытиях и в покрытии [2]. Проектирование храмов регламентируется СП 391.1325800.2017¹. Применение в покрытии храмов железобетонных пространственных конструкций из сводов и куполов предполагает моделирование сложных пространственных систем, получение и анализ напряженно-деформированного состояния сводов и куполов, используемые при проектировании, и при необходимости после возведения – мониторинг их технического состояния.

Несмотря на массовое применение монолитного железобетона в современном строительстве, по сложившейся исторической традиции стены храмов выполняются кирпичными [3]. В связи с этим хрупкие свойства кирпичных стен и ортотропный характер материалов кладки следует учитывать при моделирова-

¹ СП 391.1325800.2017. Храмы православные Правила проектирования. Москва, 2017. 61 с.

нии напряженно-деформированного состояния стеновых конструкций храмов. В моделировании важным является использование результатов экспериментальных исследований фрагментов кирпичной кладки, когда их сжатие выполняют в ортогональном направлении к горизонтальным швам кладки [4]. Полученные экспериментальные результаты позволяют достаточно корректно смоделировать плоское напряженное состояние кирпичных стен на всех стадиях работы кладки – от упругой работы до исчерпания несущей способности кирпичных стен.

Наиболее близкими к наклонным трещинам в кирпичных стенах являются экспериментальные исследования на действие сжимающей нагрузки, приложенной по диагонали фрагментов кирпичной кладки. При диагональном нагружении фрагментов за счет перераспределения внутренних усилий возникают главные сжимающие и растягивающие напряжения. Последние являются основной причиной разрушения испытываемых фрагментов [5, 6].

Целостность кирпичной кладки стен в основном определяется уровнем нормальных и касательных сил сцепления раствора кладки. Поскольку в хрупком материале кирпичной кладки предел упругости по величине близок к пределу прочности кирпича, при достижении последнего параметра наступает исчерпание несущей способности и разрушение кладки [7].

В настоящее время моделирование напряженно-деформированного состояния кладки кирпичных стен в расчетных программах выполняется с учетом ортотропных свойств материалов кладки [8]. В работе «Расчет каменных стен при сдвиге и растяжении» [9] расчет кладки методом конечных элементов выполняется двухуровневым методом, при котором сначала исследуются свойства кладки на микромоделях, а затем с учетом полученных данных выполняются расчеты всей конструкции в макромоделе.

По конструктивной схеме кирпичные стены храмов относятся к жестким системам, где влияние податливости фундаментов приобретает большое значение [10, 11]. Применение расчетных моделей системы «основание – здание» позволяет оценить совместную работу фундамента и надземной части здания [12]. Моделирование взаимодействия свайного фундамента с грунтом основания и анализ внутренних усилий в сваях выполнены в работе «Несущая способность свай на горизонтальную и моментную нагрузку и оптимальное проектирование свайных фундаментов» [13].

Определение несущей способности свай по грунту путем статических испытаний свай вдавливающей нагрузкой в настоящее время является приоритетным [14]. В своих исследованиях В.А. Барвашев определил, что грунт в области ствола сваи имеет в целом одинаковую осадку [15]. С увеличением расстояния от сваи эта осадка убывает. В еще одной рассматриваемой научной работе [16] была определена зависимость осадки ненагруженной сваи от ее расстояния до нагруженной сваи. Используя полученную зависимость, можно получить суммарную осадку всего свайного основания.

В работе В.И. Шумейко [17] показано уменьшение влияния распора в конструктивной системе крестово-купольной конструкции храма. Расчеты проведены в программе ЛИРА, где выполнен анализ напряженно-деформированного состояния пространственной расчетной модели крестово-купольной системы храма.

Одним из основных критериев адекватности расчетной модели является ее соответствие конструктивной схеме здания при формировании напряженно-деформированного состояния надземных несущих конструкций, фундаментов и грунтового основания [18]. В программном комплексе Ing+ MicroFe можно выполнить моделирование пространственных конструкций здания в системе «основание – фундамент – здание» [19].

В настоящей статье использованы проектные решения храма во имя Новомучеников и Исповедников Российских (далее храм), разработанные ООО «Акватех+». По конструктивной системе здание храма представляет собой двухуровневый объем. Высота храма переменная и составляет 10,8 м в притворе, в алтарной части – 14,225 м, в центральной части здания под «небом» – 22,75 м. В плане здание имеет размер 23,4×20,28 м (рис. 1). Кладка подвала выполнена из бетонных блоков, стены храма кирпичные. Перекрытие подвала сборное железобетонное. В центральной части храма расположены четыре колонны и опорное кольцо. На колонны опираются четыре центральные арки, связанные между собой кольцом. Сбоку к колоннам примыкают по две арки. Все конструкции монолитные железобетонные из бетона класса В25.

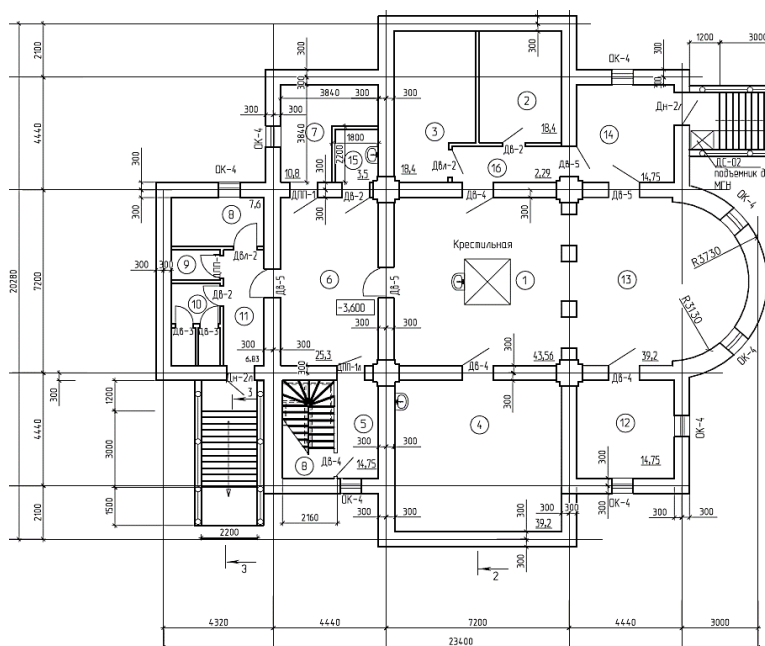


Рис. 1. План подвала храма (данные ООО «Акватех+»)

Fig. 1. Plan view of the underground floor of the Church (ООО Akvatekh+)

Свайный ленточный фундамент храма запроектирован в виде перекрестного монолитного железобетонного ростверка с поперечным сечением 700×450 (h) мм и сборных железобетонных свай сечением 300×300 мм длиной 7 м. Допускаемая расчетная нагрузка на сваи составляет $N_{\text{доп}} = 420$ кН. Инженерно-геологический разрез с привязкой фрагмента свайного фундамента приведен на рис. 2. Опорным слоем свай является ИГЭ-4.

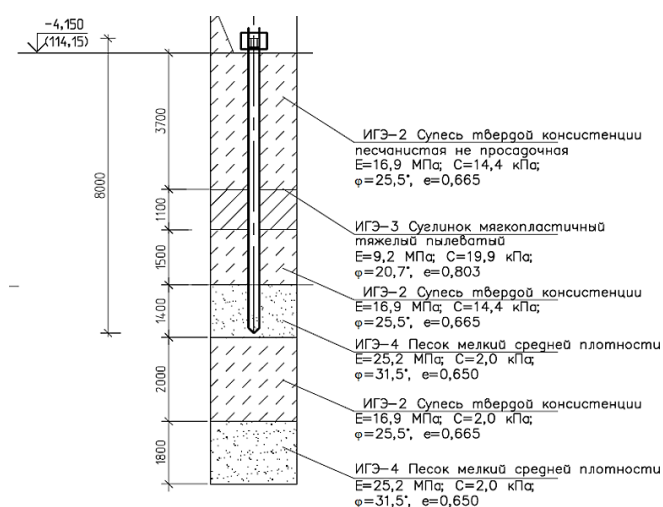


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез с привязкой свайного фундамента (данные ООО «Нефрит»)

Fig. 2. Engineering-geological section with reference to the pile foundation (ООО Nefrit)

Расчетная модель здания храма была разработана в программе Ing+2021 MicroFe (рис. 3). Бетон в железобетонных конструкциях принят как изотропный материал, материал кирпичной кладки стен – ортотропный, в котором вертикальный модуль упругости принят в десять раз больше горизонтального модуля упругости, что хорошо коррелируется с принятой практикой проектирования каменных конструкций. Расчет слоистого основания, свайного фундамента и железобетонных конструкций выполнен в линейной постановке, кирпичных стен – в нелинейной постановке по теории предельных поверхностей [20].

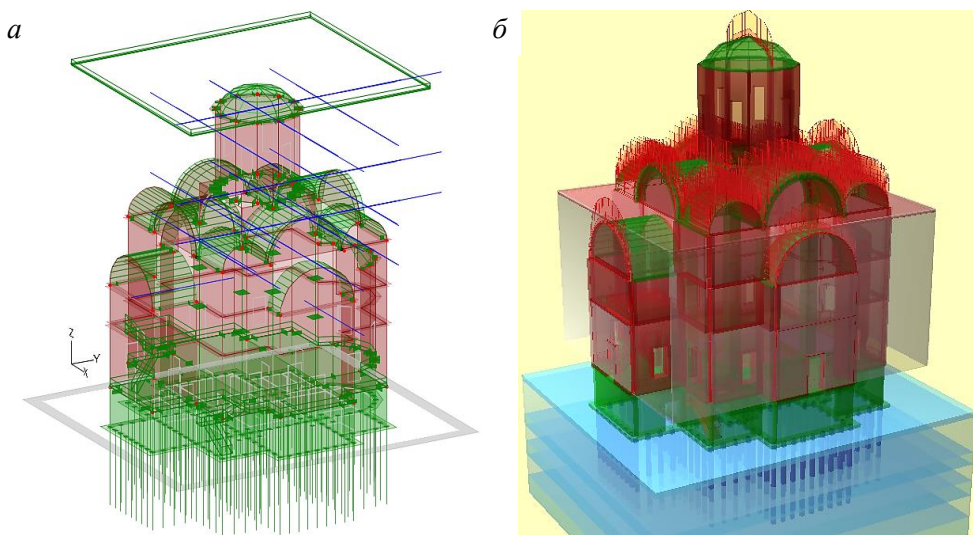


Рис. 3. Расчетная модель храма (а) и ее визуализация (б)
Fig. 3. FEM of the Church (a) and its visualization (b)

Краткий анализ напряженно-деформированного состояния здания храма

В горизонтальном сечении основания на уровне острия свай изополя вертикальных нормальных напряжений приведены на рис. 4, который демонстрирует, что наибольшие сжимающие напряжения возникают под угловыми сваями и составляют $\sigma_{z \max} = 220 \text{ кН/м}^2$. Такое распределение напряжений характерно для жестких сооружений башенного типа с небольшой пятой застройки. При этом расчетное сопротивление грунта опорного слоя свай – ИГЭ-4 – песок мелкий средней плотности – равно $R_0 = 300 \text{ кН/м}^2$. Напряжения в грунте в межсвайном пространстве значительно ниже и не превышают 50 кН/м^2 .

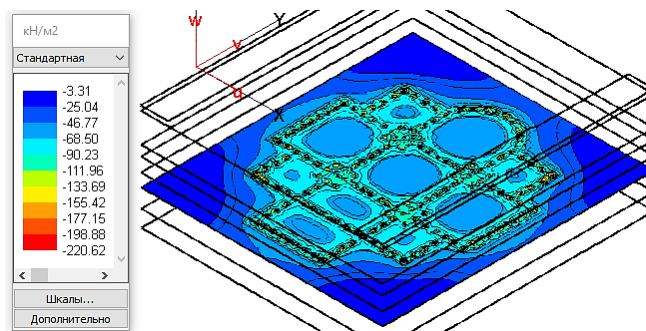


Рис. 4. Изополя вертикальных нормальных напряжений σ_z в грунте на уровне пят свай

Fig. 4. Isofields of vertical normal stress σ_z in soil at the pile heels

Изополя продольных сил в сваях показаны на рис. 5, откуда следует, что максимальные значения продольных сил появляются в угловых сваях и составляют $N_{\max} = 504,3 \text{ кН}$, которые на 17 % больше допускаемой расчетной нагрузки на сваи $N_{\text{доп}} = 420 \text{ кН}$. Полученная разница между продольными силами в угловых и внутренних сваях указывает на достаточно большую изгибную жесткость бетонных стен подвала и кирпичных стен надземной части храма [12]. Следует отметить, что при учете ветровой нагрузки величину продольных сил в контурных сваях допускается увеличивать на 20 % относительно допускаемой расчетной нагрузки на сваи.

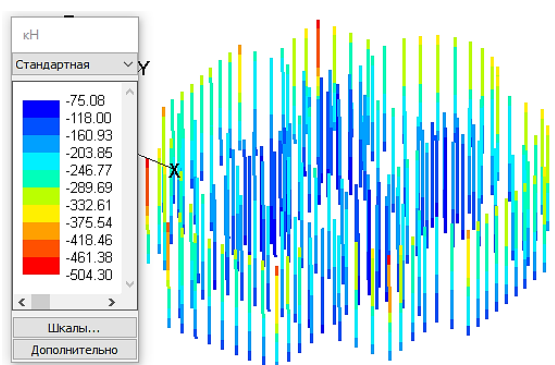


Рис. 5. Изополя продольных сил в сваях

Fig. 5. Isofields of axial forces in piles

Изополя вертикальных перемещений свай приведены на рис. 6, из которого следует, что, в соответствии с общепринятым характером распределения осадок свай в грунтовом массиве [16], наибольшие вертикальные перемещения характерны для внутренних свай и составляют $f_{\max} = 17,4$ мм, что значительно меньше предельно допустимых значений осадок.

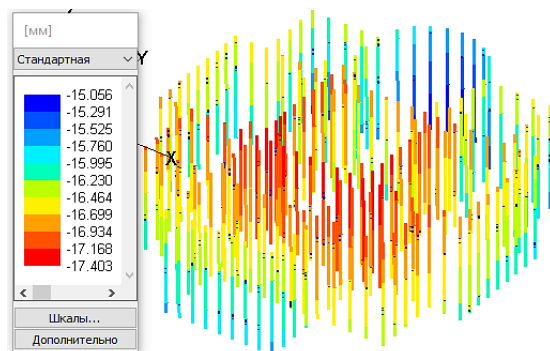


Рис. 6. Изополя вертикальных перемещений свай
Fig. 6. Isofields of vertical displacements of piles

В кирпичных стенах храма при проектных значениях марки кирпича М150 и цементно-песчаного раствора М75 расчетные характеристики кирпичной кладки составят следующие значения: расчетное сопротивление $R = 2000$ кН/м²; осевое растяжение $R_t = 200$ кН/м²; срез $R_{sq} = 800$ кН/м²; главные растягивающие напряжения $R_{sb} = 300$ кН/м². Расчетным путем получены следующие значения напряжений в кладке стен: наибольшие нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{сж} = 438$ кН/м² < $R = 2000$ кН/м²; максимальные нормальные растягивающие напряжения $\sigma_p = 173$ кН/м² < $R = 200$ кН/м²; наибольшие сдвигающие напряжения $\sigma_{сд} = 34$ кН/м² < $R_{sq} = 800$ кН/м²; максимальные главные растягивающие напряжения $\sigma_{сд} = 70$ кН/м² < $R_{sq} = 300$ кН/м² (рис. 7). Таким образом, все расчетные параметры напряжений в кладке не превышают соответствующие нормативные значения.

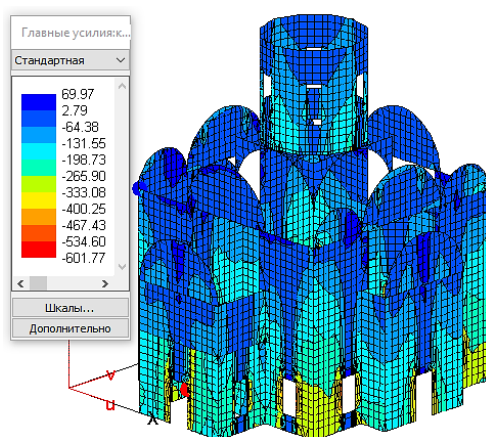


Рис. 7. Изополя главных напряжений в кладке стен храма
Fig. 7. Isofields of main stresses in the Church masonry

Изополя коэффициентов использования кладки стен по несущей способности показаны на рис. 8, откуда следует, что их наибольшие значения составили $\text{Max } k = 0,709544 < 1$. Таким образом, для кирпичной кладки стен условие по первой группе предельных состояний выполняется.

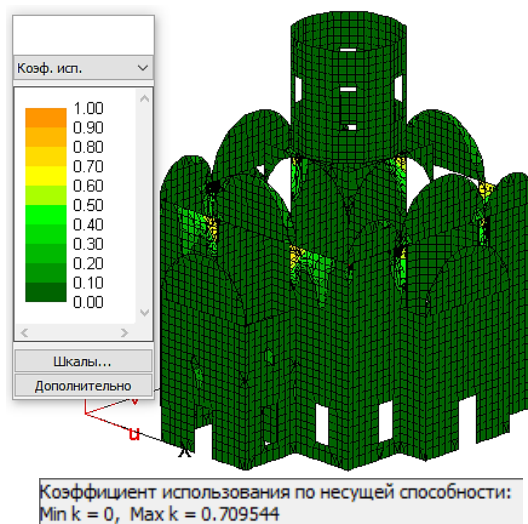


Рис. 8. Изополя коэффициентов использования кладки стен по несущей способности
Fig. 8. Isofields of operational factor of masonry by load-bearing capacity

Изополя изгибающих моментов в сводах и в куполе M_s относительно оси их вращения приведены на рис. 9. Изополя расчетного продольного армирования в сводах и в куполе вдоль их образующей показаны на рис 10, из которого следует что максимальное значение коэффициента использования арматуры по первому предельному состоянию $\text{Max} = 1,06867 \approx 1$. Таким образом, условие по первому предельному состоянию практически выполнено.

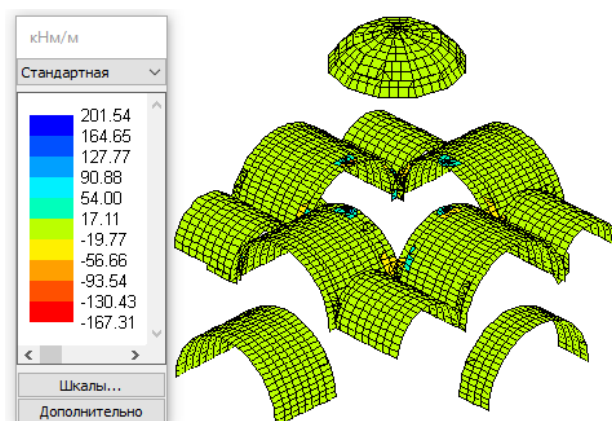


Рис. 9. Изополя изгибающих моментов M_s в сводах и в куполе относительно оси их вращения
Fig. 9. Isofields of flexural moments M_s in arches and dome relative to their rotation

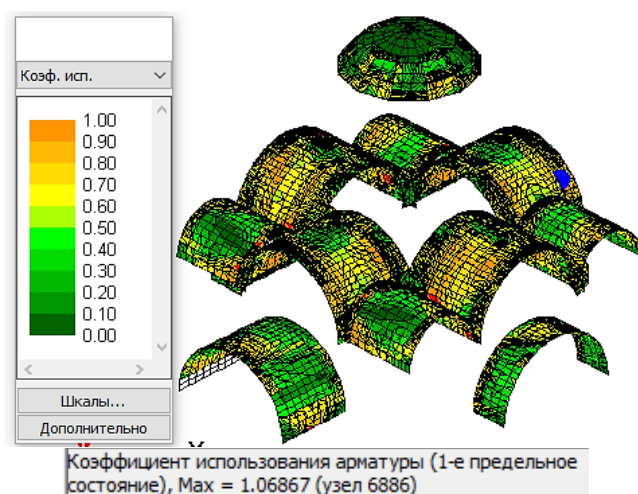


Рис. 10. Изополя расчетного продольного армирования A_s в сводах и куполе вдоль их образующей
 Fig. 10. Isofields of calculated axial reinforcement A_s in arches and dome relative to their moving line

Заключение

При разработке проекта храма в связи с наличием сложных пространственных распорных конструкций из сводов и купола возникла необходимость в создании пространственной модели храма в системе «основание – фундамент – здание».

Моделированием выявлено напряженно-деформированное состояние грунтового основания, свайного фундамента и несущих конструкций надземной части здания храма.

Расчетным путем определено, что на уровне пят свай фундамента значения вертикальных сжимающих нормальных напряжений в грунте составили 2/3 от расчетного сопротивления грунта опорного слоя свайного фундамента.

Полученные значения и характер распределения продольных сил в сваях указывают на достаточно большую изгибную жесткость подвальной и надземной частей здания храма, когда наибольшие значения продольных сил возникают не во внутренних, а в угловых и контурных сваях. При этом расчетная величина вертикальных перемещений свай значительно меньше предельно допустимых значений.

В надземной части здания храма коэффициент использования кирпичной кладки стен по несущей способности меньше единицы, и условие по первой группе предельных состояний выполняется.

В распорных конструкциях сводов и купола, а также в монолитных железобетонных поясах под ними подобранная расчетная арматура позволяет обеспечить их несущую способность и надежность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рябухина С.А. Каменные сводчатые конструкции: история, классификация, применение // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 6 (33). С. 88–97.
2. Борисов С.В., Багдасарян М.Л. Железобетон в конструкциях и архитектуре православных храмов // Приволжский научный вестник. 2015. № 7 (47). С. 31–34.

3. Невзоров А.Л., Никитин А.В., Аксенов С.Е., Заручевных А.В. Конструктивные особенности исторических зданий в Архангельске // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 35–37.
4. Копаница Д.Г., Усеинов Э.С., Устинов А.М. Деформации и разрушение фрагмента каменной кладки при кратковременном действии сжимающей статической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 90–97.
5. Деркач В.Н., Белов В.В. Прочность каменной кладки на растяжение под углом к горизонтальным растворным швам // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2. С. 65–70.
6. Грановский А.В., Сайфулина Н.Ю., Гасиев А.А. К оценке достоверности экспериментальных методов испытаний каменных конструкций на перекося // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 3. С. 31–35.
7. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Результаты исследований каменных и армокаменных кладок // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 99–106.
8. Кабанцев О.В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 113–133.
9. Ицук М.К., Ицук В.Л. Расчет каменных стен при сдвиге и растяжении // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 31–39.
10. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Москва : Изд-во АСВ, 2014. 728 с.
11. Шапкин В.А. Эффекты взаимодействия оснований и сооружений // Развитие городов и геотехническое строительство. 2012. № 14. С. 141–167.
12. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. Москва, 2016. 392 с.
13. Королев К.В., Полянкин А.Г., Кузнецов А.А. Несущая способность свай на горизонтальную и моментную нагрузку и оптимальное проектирование свайных фундаментов // Транспортное строительство. 2013. № 3. С. 13–15.
14. Шулятьев О.А. Геотехнические особенности проектирования высотных зданий в Москве // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 17–25.
15. Барващов В.А. Метод расчета жесткого свайного ростверка с учетом взаимного влияния свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1968. № 3. С. 27–28.
16. Боков И.А., Федоровский В.Г. Взаимовлияние свай через грунт: сравнение аналитических оценок // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 26–30.
17. Шумейко В.И., Левшиков С.С. Оптимальное проектирование элементов крестово-купольных систем // Вестник Евразийской науки. 2018. № 1. С. 1–11.
18. Нухедин Л.В., Михайлов В.С. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. № 1. С. 5–18.
19. Юцубе С.В., Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния свайного фундамента с плитным ростверком высотного здания с учетом недопогружения свай // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 145–161.
20. Семенов Д.А. Прочность железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5. С. 76–84.

REFERENCES

1. Ryabukhina S.A. Stone Vaulted Structures: History, Classification, Application. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2015; 6 (33): 88–97. (In Russian)
2. Borisov S.V., Bagdasaryan M.L. Reinforced Concrete in Construction and Architecture of Orthodox Churches. *Privolzhskii nauchnyi vestnik*. 2015; 7 (47): 31–34. (In Russian)
3. Nevzorov A.L., Nikitin A.V., Aksenov S.E., Zaruchevnykh A.V. Design Features of Historic Buildings in Arkhangelsk. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012; (10): 35–37. (In Russian)
4. Kopanitsa D.G., Useinov E.S., Ustinov A.M. Deformation and Fracture of Masonry under Compressive load. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (6): 90–97. (In Russian)

5. Derkach V.N., Belov V.V. Tensile Strength of Masonry at an Angle to Horizontal Mortar Joints. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012; (2): 65–70. (In Russian)
6. Granovskii A.V., Saifulina N.Yu. Gasiev A.A. Reliability Assessment of Experimental Methods for Testing Stone Structures for Skew. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (3): 31–35. (In Russian)
7. Sokolov B.S., Antakov A.B. Masonry and Reinforced Masonry. *Vestnik MGSU*. 2014; (3): 99–106. (In Russian)
8. Kabantsev O.V. Discrete Model of Masonry under Biaxial Stresses. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (4): 113–133. (In Russian)
9. Ishchuk M.K., Ishchuk V.L. Strength Analysis of Stone Walls under Shear and Tension. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; (8): 31–39. (In Russian)
10. Il'ichev V.A., Mangusheva R.A. (Eds.) Geotechnical Handbook. Foundations, Footings, and Underground Structures. Moscow: ASV, 2014. 728 p. (In Russian)
11. Shashkin V.A. Interaction between Foundations and Structures. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2012; (14): 141–167. (In Russian)
12. Shulyat'ev O.A. Bases and Foundations of High-Rise Buildings. Moscow: ASV. 2016. 392 p. (In Russian)
13. Korolev K.V., Polyankin A.G., Kuznetsov A.A. Load-Bearing Capacity of Piles under Horizontal and Moment Loads and Best Pile Foundation Design. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2013; (3): 13–15. (In Russian)
14. Shulyat'ev O.A. Geotechnical Design of High-Rise Buildings in Moscow. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016; (10): 17–25. (In Russian)
15. Barvashov V.A. Calculation Technique for Rigid Pile Grillage with Regard to Mutual Pile Effect. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 1968; (3): 27–28. (In Russian)
16. Bokov I.A., Fedorovskii V.G. Winter Impact of Piles through Soil: Comparison of Analytical Estimates. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016; (10): 26–30. (In Russian)
17. Shumeiko V.I., Levshakov S.S. Optimum Design of Cross-Dome System Elements. *Vestnik Evraziiskoi nauki*. 2018; (1): 1–11. (In Russian)
18. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Creation of Solid 3D CAD Pile Foundations in SCAD Software. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2018; (1): 5–18. (In Russian)
19. Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Modeling of Stress-Strain State of High-Rise Building Pile Raft Foundation with Incomplete Pile Installation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (2): 145–161. (In Russian)
20. Semyonov D.A. Strength of Reinforced Concrete Elements under Oblique Off-Center Compression. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; (5): 76–84. (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 15.12.2025
Одобрена после рецензирования 30.12.2025
Принята к публикации 02.02.2026

Submitted for publication 15.12.2025
Approved after review 30.12.2025
Accepted for publication 02.02.2026

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 192–206.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 192–206.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131.7

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-192-206

EDN: OGEPBE

ВЛИЯНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТА ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ОПЫТНОЙ ПЛОЩАДКИ В ГОРОДЕ ТОМСКЕ

**Максим Алексеевич Власов^{1,2}, Николай Юрьевич Никулин^{2,3},
Олег Васильевич Герасимов^{1,4}, Аркадий Александрович Петухов⁵**

¹Кузбасский государственный технический университет

имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

²ООО «ПК «НООСТРОЙ»», г. Кемерово, Россия

³Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

⁴ООО «НООЦЕНТР», г. Кемерово, Россия

⁵Кубанский государственный аграрный университет

имени И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью укрепления грунтового основания и снятия аварийности со здания, расположенного в г. Томске. Сложные инженерно-геологические условия, включая наличие слоистого разреза, двух водоносных горизонтов, карьеров и оврагов, а также оползневый склон правого берега р. Томи, требуют проведения комплексных работ по обследованию и укреплению грунта.

Целью работы является разработка и реализация проектных решений для устранения пустот и полостей в грунте, а также для улучшения несущей способности основания здания. Для этого были проведены инженерно-геологические изыскания, включая бурение скважин и геофизические исследования, такие как сейсморазведка и электроразведка.

В результате проведенных работ были разработаны проектные решения, включающие заполнение пустот инъекционными растворами, устройство законтурной обоймы и уплотнение грунтового основания. Эти меры позволили стабилизировать состояние грунта и предотвратить дальнейшее развитие деформаций.

Особое внимание уделено анализу графиков, включая проектную схему уплотнения при гидроразрыве и график ползучести при постоянном напряженном состоянии согласно реологической модели А.М. Самедова и Д.В. Ткача для уплотненных грунтов. Эти графики сравниваются и демонстрируют изменение давления при уплотнении. На основании экспериментальной площадки была получена фактическая схема уплотнения при гидроразрыве, которая позволила оценить эффективность проведенных мероприятий и подтвердить соответствие проектных решений реальным условиям.

Выводы. Результаты исследований подтверждают, что инженерно-геологические изыскания и геофизические исследования являются необходимыми этапами в процессе укрепления грунтового основания и снятия аварийности здания. Они обеспечивают надежную основу для принятия обоснованных решений и разработки эффективных мероприятий по укреплению, что в конечном итоге способствует повышению безопасности и долговечности конструкций. Ползучесть грунта является одним из ключевых факторов, влияющих на ухудшение НДС грунта, и требует особого подхода при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений.

Ключевые слова: торговый центр, инженерно-геологические изыскания, геофизические исследования, пустоты, уплотнение, гидроразрыв, напряженное состояние

Для цитирования: Власов М.А., Никулин Н.Ю., Герасимов О.В., Петухов А.А. Влияние ползучести грунта при укреплении оснований фундаментов зданий и сооружений на примере опытной площадки в городе Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 192–206. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-192-206. EDN: OGEPBE

ORIGINAL ARTICLE

SOIL CREEP IN BUILDING FOUNDATION STRENGTHENING ON EXPERIMENTAL SITE IN TOMSK

Maksim A. Vlasov^{1,2}, Nikolay Y. Nikulin^{2,3},
Oleg V. Gerasimov^{1,4}, Arkady A. Petukhov⁵

¹Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

²ООО 'NOOSTROY', Kemerovo, Russia

³Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

⁴ООО 'NOOTSENTR', Kemerovo, Russia

⁵Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Abstract. The relevance of the study is due to the necessity of the foundation reinforcement and removal of the emergency status from a building located in Tomsk. Engineering-geological conditions, including the presence of a layered section, two aquifers, quarries and ravines, as well as the landslide slope of the right bank of the Tom River, require the implementation of comprehensive works for the ground survey and reinforcement.

Purpose: The aim of the work is to develop and implement design solutions for eliminating voids and cavities in the ground, and improve the load-bearing capacity of the building foundation. Engineering-geological surveys include borehole drilling and geophysical studies such as seismic and electrical exploration.

Research findings: As a result of the conducted work, design solutions are developed, including filling voids with injection solutions, installation of an external clip, and compaction of the ground foundation. These measures allow stabilizing the soil condition and prevent further development of deformations.

Methodology: Special attention is paid to the analysis of graphs, including the design scheme for compaction during hydraulic fracturing and the creep graph under constant stress state ac-

cording to the rheological model by A.M. Samedov and D.V. Tkach for compacted soils. These graphs are compared and demonstrate a change in pressure during the compaction. Based on the experimental site, an actual compaction scheme during hydraulic fracturing is obtained, allowing to assess the effectiveness of the conducted activities and confirm the compliance of design solutions with real conditions.

Value: Research results confirm that engineering-geological surveys are essential stages of foundation reinforcement and removal of the emergency status of the building. They provide a reliable basis for making decisions and developing effective measures for reinforcement, which ultimately contributes to enhancing the safety and durability of structures. Soil creep is one of the key factors affecting the soil stress-strain state, and requires special attention in building design and operation.

Keywords: shopping center, engineering-geological survey, geophysical study, void, compaction, hydraulic fracturing, stress state

For citation: Vlasov M.A., Nikulin N.Yu., Gerasimov O.V., Petukhov A.A. Soil Creep in Building Foundation Strengthening on Experimental Site in Tomsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 192–206. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-192-206. EDN: OGEPBE

Введение

Инженерно-геологические изыскания и геофизические исследования играют ключевую роль в укреплении грунтового основания и обеспечении безопасности эксплуатации зданий и сооружений, особенно в условиях, когда конструкции находятся в аварийном состоянии. Эти методы позволяют получить детальную информацию о состоянии грунта, его свойствах и дефектах, что является основой для разработки эффективных мер по укреплению и предотвращению дальнейших деформаций.

Инженерно-геологические изыскания включают бурение скважин, отбор проб грунта и проведение лабораторных исследований, что позволяет определить физико-механические свойства грунта, его несущую способность и устойчивость [1–6]. Геофизические исследования, такие как сейсморазведка, электро-разведка и георадар, дополняют эти данные, предоставляя информацию о структуре грунта, наличии пустот и полостей, а также о распределении в плане [7–10].

На основе полученных данных разрабатываются проектные решения, которые включают инъектирование пустот специальными растворами, уплотнение грунта и другие методы укрепления [11–13]. Эти меры направлены на улучшение несущей способности грунта, предотвращение его дальнейшей деформации и обеспечение безопасности здания.

Таким образом, инженерно-геологические изыскания и геофизические исследования являются необходимыми этапами в процессе укрепления грунтового основания и снятия аварийности со здания [3, 14, 15]. Они обеспечивают надежную основу для принятия обоснованных решений и разработки эффективных мероприятий по укреплению, что в конечном итоге способствует повышению безопасности и долговечности конструкций.

Объекты и методика исследования

Площадка изысканий расположена в г. Томске, на правом берегу р. Томи, в районе проезда Вершинина. Рассматриваемый объект представляет собой со-

оружение, состоящее из навесов, стеллажей, закрытых складских площадок. Данная территория имеет плотную застройку общественными зданиями с сопутствующими инженерными коммуникациями.

Согласно данным визуальных обследований, здание находится в аварийном состоянии вследствие существенных неравномерных деформаций полов (рис. 1).

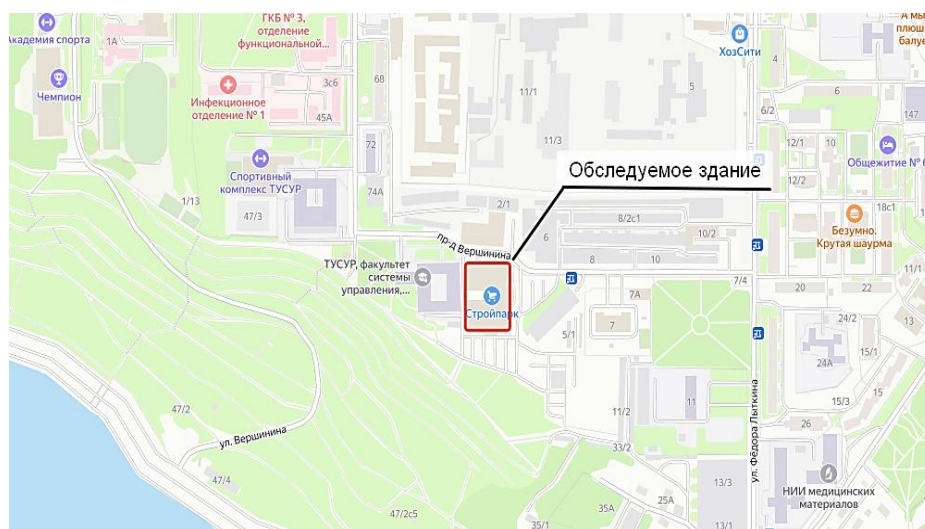


Рис. 1. Схема расположения объекта

Fig. 1. The object layout

Исследуемая площадка располагается на территории, характеризующейся сложными инженерно-геологическими условиями, которые обусловлены наличием слоистого разреза, двух водоносных горизонтов, карьеров и оврагов, а также оползневого склона правого берега р. Томи.

На основании этого было принято решение провести ряд работ по комплексному обследованию здания. В рамках этих работ были пробурены инженерно-геологические скважины внутри помещений (рис. 2). Это позволило получить детальную информацию о состоянии грунтов, выявить возможные пустоты и зоны разуплотнения, а также определить причины неравномерных деформаций полов.

Согласно Госгеолкарте РФ (1:200 000) 2008 г., в основании разреза залегают палеогеновые отложения (P_{3lg}) лагерьномской свиты, представленные песками тонкозернистыми, алевроитами, глинами, бурыми углями. Коренные породы на участке работ перекрыты рыхлыми покровными отложениями среднечетвертичного и современного возраста. Отложения четвертичной системы представлены глинами, суглинками, супесями, песками, гравийными и галечными отложениями. Мощность четвертичного покрова изменяется в широких пределах.

Современные отложения представлены насыпным грунтом ИГЭ-1, который состоит из смеси песка, гравия, щебня и строительного мусора. Этот грунт залегает непосредственно под железобетонной плитой (рис. 3). Со-

гласно данным «Пособия по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01–83)», период самоуплотнения насыпного грунта для пылеватоглинистых грунтов составляет 10–30 лет.

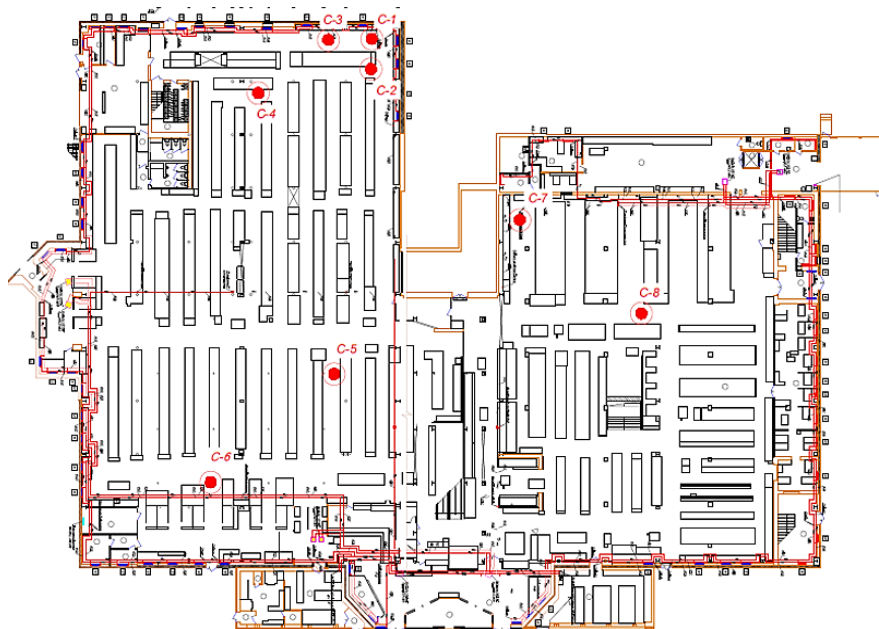


Рис. 2. Схема расположения инженерно-геологических скважин
Fig. 2. Layout of engineering and geological wells

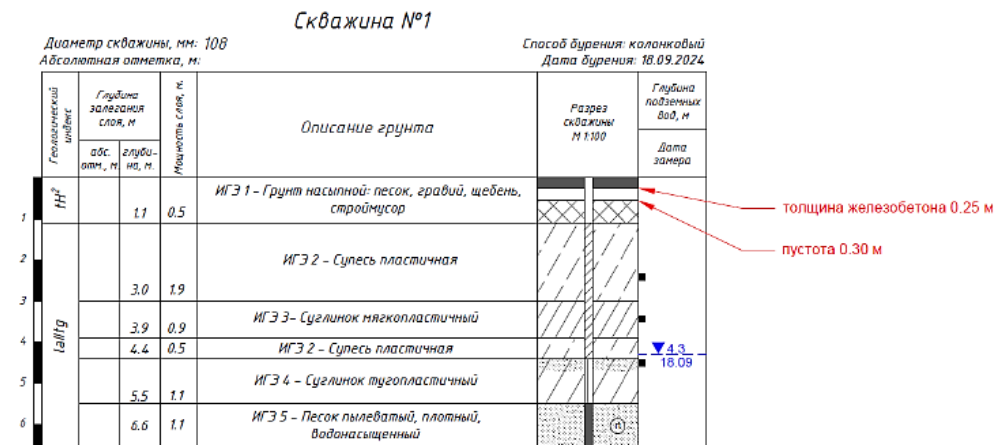


Рис. 3. Геолого-литологическая колонка скважины № 1
Fig. 3. Geological and lithological column of well 1

Были обнаружены пустоты под железобетонной плитой (рис. 4), что указывает на наличие проблем с основанием здания. Эти пустоты могут быть вызваны различными факторами, такими как неравномерная осадка, вызванная

самоуплотнением, некачественным уплотнением при производстве работ. Для более точного анализа ситуации были проведены дополнительные исследования, включая геофизические методы, такие как сейсморазведка и электроразведка, которые позволили определить размеры и расположение пустот в плане.

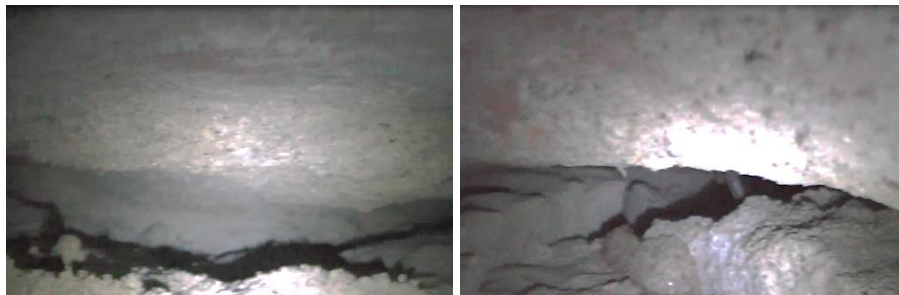


Рис. 4. Фотографии пустот
Fig. 4. Photographs of voids

Для более точного анализа ситуации были проведены геофизические исследования, включая георадиолокационное профилирование с установлением в плане расположения аномальных зон (пустоты, разуплотнение, отсутствие армирования) (рис. 5).

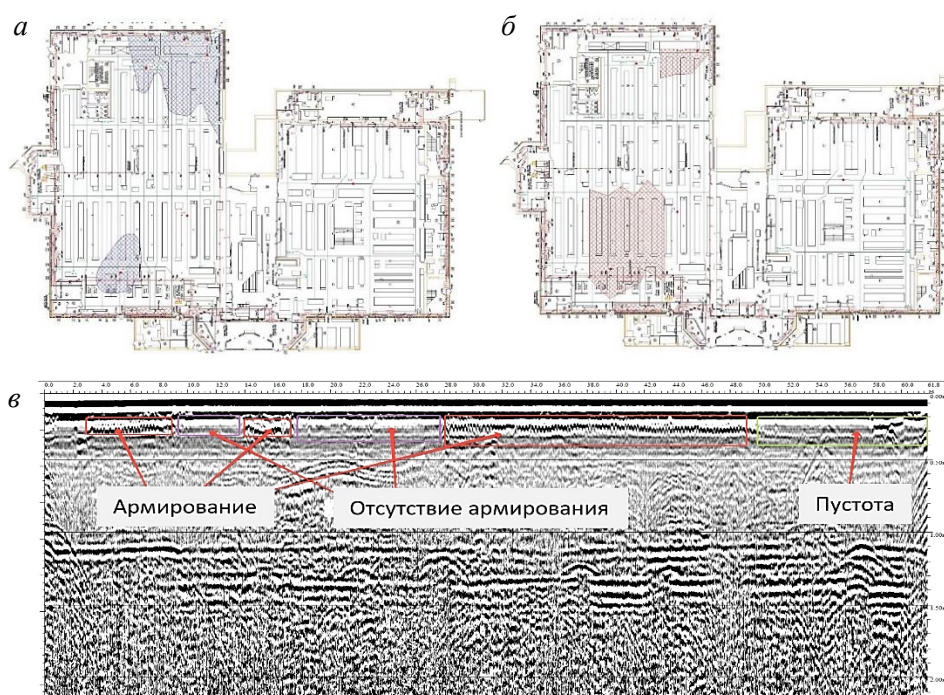


Рис. 5. Схема расположения выявленных пустот (а) и участков без армирования (б) под ж/б плитой; продольный разрез (в)

Fig. 5. Layout of identified voids (a) and areas without reinforcement (b) under steel-concrete plate; longitudinal section (c)

Георадиолокационное сканирование осуществлялось по всей площади в пределах ТЦ по сети продольных и поперечных профилей аппаратурой ОКО-2 (ООО «Логис») с антенным блоком АБ-1200 на частоте 1200 МГц по ж/б полу, расположенному на 1-м этаже здания. Максимальная глубина зондирования зависела от электрофизических свойств изучаемой среды и частоты зондирующего сигнала, что для данного типа антенного блока и состава грунтового массива с диэлектрической проницаемостью ≈ 9 составила 2,1 м.

Для интерпретации данных георадиолокационной съемки использовалась измерительная программа Geoscan32 v2.3 b4 (ООО «Логис»), которая позволяет производить усиление сигнала, частотную фильтрацию с целью подавления помех. Также применялись различные цветовые схемы для улучшения визуализации и производилась корректировка глубины исследований путем назначения эффективной диэлектрической проницаемости для грунтового массива. Корректировка ϵ с переходом от временного до глубинного разреза осуществлялась с использованием данных бурения путем сопоставления выявленных геологических элементов со слоями, обнаруженными георадиолокационным сканированием.

Проектные решения

Были разработаны проектные решения (рис. 6) для проведения работ в 3 этапа.

1. Заполнение выявленных пустот и полостей: для устранения пустот под железобетонной плитой использованы специальные инъекционные растворы, которые вводились под давлением. Это позволило заполнить пустоты и укрепить основание, предотвращая дальнейшее развитие деформаций.

2. Устройство законтурной обоймы: для предотвращения выхода раствора за контур укрепления.

3. Уплотнение грунтового основания: для улучшения несущей способности грунта. Это включало использование методов динамического уплотнения или виброуплотнения, что позволило повысить плотность грунта и уменьшить его сжимаемость.

Проектные решения были разработаны согласно методическому пособию по укреплению грунтов методом струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекцией растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов к подразделу 6.9 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» [16].

Площадь зоны инъектирования определялась по формуле

$$A = \left(\frac{\pi d_n^2}{4} - \frac{\pi d_{n-1}^2}{4} \right),$$

где d_n – диаметры размеров зон, м.

Для определения объема цементно-песчаного раствора, необходимого для образования узлов жесткости, использовалась формула

$$V_p = (V_1 v_1 + V_2 v_2 + V_3 v_3 + V_4 v_4 + V'_4 v'_4) h,$$

где V_1, V_2, V_3, V_4, V'_4 – объемы бетонного тела, зоны упрочнения, зоны опрессования, зоны интенсивного уплотнения, зоны интенсивного обжатия соответственно; h – длина инъектора.

Начальное давление рассчитывалось по формуле

$$P_0 = P_{кр} + V_e (P_{кр} + P_a) / V_0,$$

где V_e – объем рабочей емкости; V_0 – объем ресивера; P_a – атмосферное давление; $P_{кр}$ – критическое давление, определяемое по результатам пробных испытаний прессиометром или пробной инъекции.

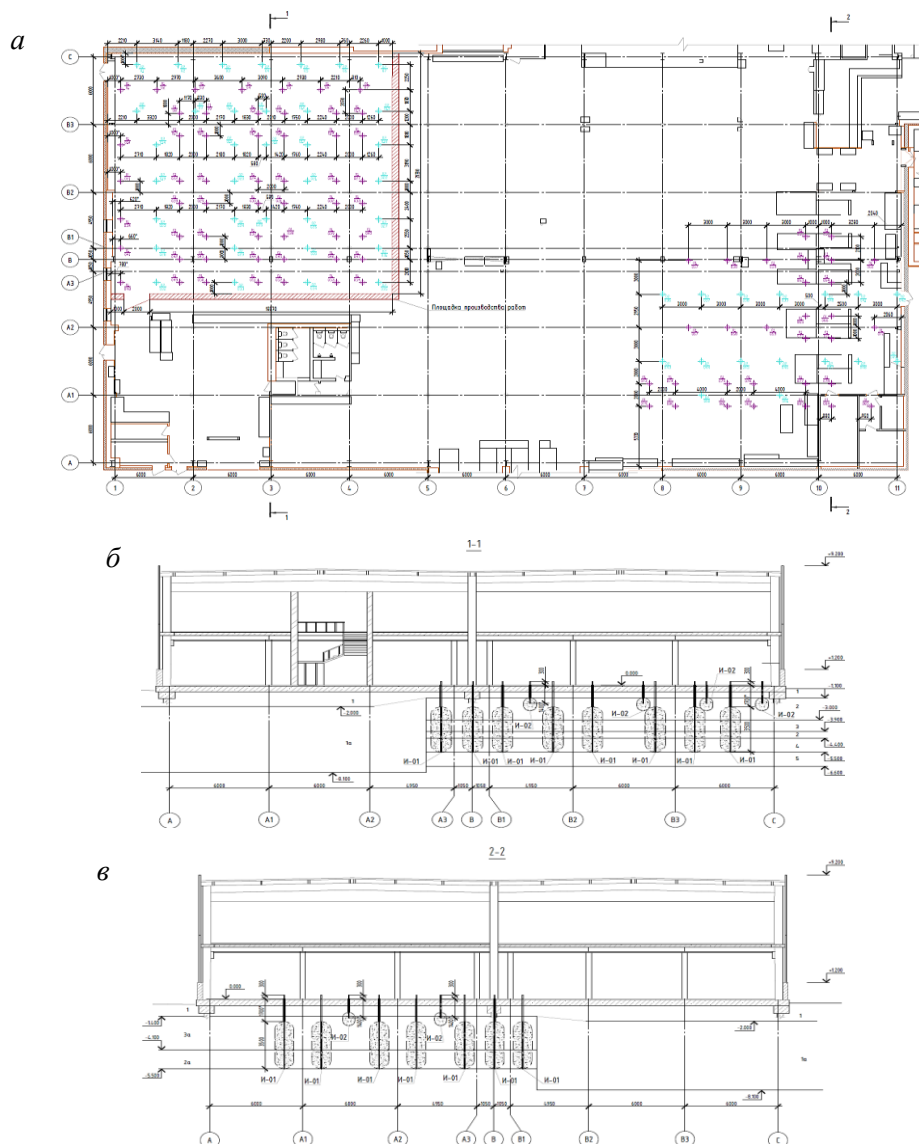


Рис. 6. План (а) и схемы уплотнения грунтового основания (б)
Fig. 6. Ground compaction plan (a) and schemes (b)

Геофизические исследования проводились с использованием методов, которые позволяли оценить изменения в массиве грунта до и после проведения укрепительных работ и построить профили в сечениях, где планировалось укрепление грунта, а также в сечениях естественного грунта, находящегося за пределами зоны укрепления. Это дало возможность получить детальную информацию о состоянии грунта и его изменениях после проведения работ, что способствовало более точному анализу и оценке эффективности проведенных мероприятий. Для этого была выполнена опытная площадка (рис. 7).

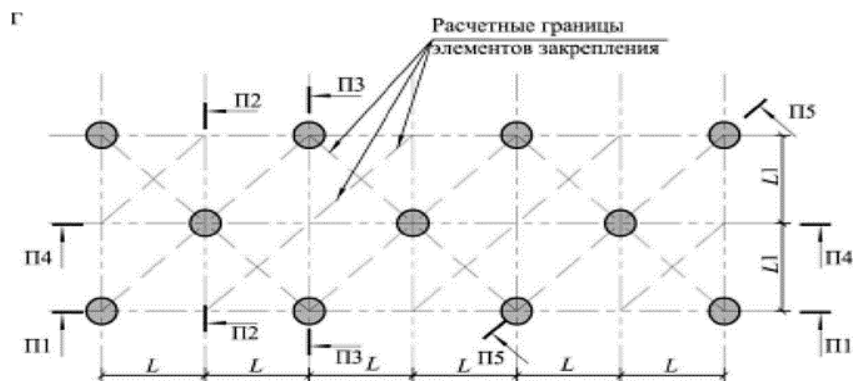


Рис. 7. Расстановка инъекторов на опытной площадке:

П1–П5 – сечение профиля геофизических исследований

Fig. 7. Placement of injectors on the experimental site: P1–P5 is the geophysical research profile

На основе полученных данных была разработана проектная схема уплотнения при гидроразрыве (рис. 8), согласно которой при начале подачи раствора давление ($P_{кр}$) достигало максимума в диапазоне 0,2–0,4 МПа. При закачивании раствора непосредственно в инъектор давление (P_0) снижалось и поддерживалось на постоянном уровне 0,2 МПа.

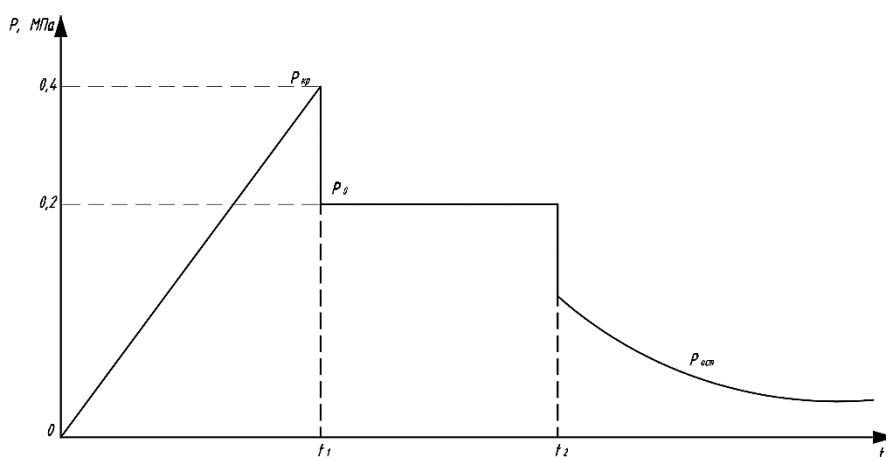


Рис. 8. Проектная схема уплотнения при гидроразрыве

Fig. 8. Design scheme of hydraulic fracturing soils

В работах С.Р. Месчяна, А.М. Самедова и Д.В. Ткача [17, 18] ползучесть при постоянном напряженном состоянии, согласно реологической модели, соответствует графику (рис. 9).

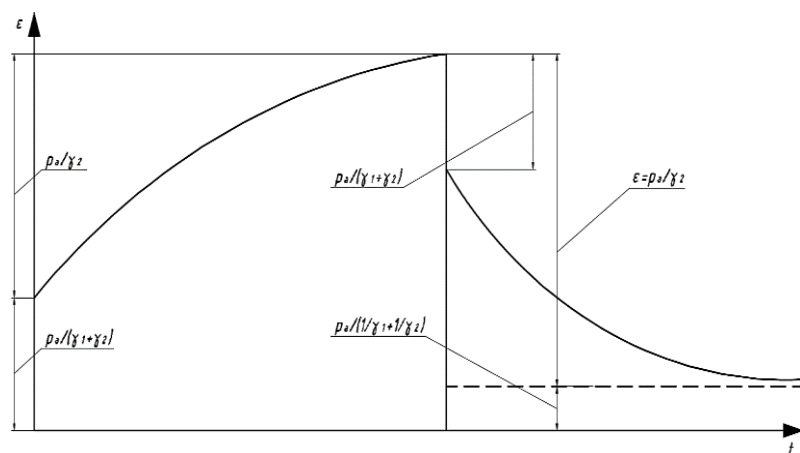


Рис. 9. Ползучесть при постоянном напряженном состоянии согласно реологической модели А.М. Самедова и Д.В. Ткача для уплотненных грунтов

Fig. 9. Creep under constant stress according rheological model of compacted soils by Samedov and Tkach

Результаты

При производстве работ на опытной площадке была составлена схема приготовления и нагнетания цементно-песчаного раствора (рис. 10). Эта схема необходима для обеспечения равномерного и качественного заполнения пустот и полостей в грунте, а также для контроля за процессом инъектирования. Она позволяет регулировать состав раствора, его консистенцию и давление нагнетания, что способствует эффективному укреплению грунта и предотвращению дальнейших деформаций.

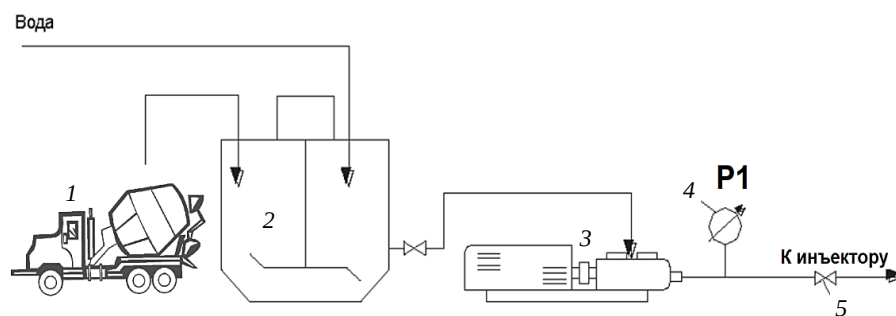


Рис. 10. Схема приготовления и нагнетания цементно-песчаного раствора:

1 – автобетоносмеситель; 2 – растворомешалка с дозатором; 3 – растворонасос; 4 – манометр; 5 – кран шаровой

Fig. 10. Schematic preparation and injection of cement-sand mortar:

1 – concrete mixer truck; 2 – mortar mixer with dispenser; 3 – solution pump; 4 – pressure gauge; 5 – ball valve

Цементно-песчаный раствор доставлялся на площадку готовым от завода-изготовителя, где на месте доводился до рабочей консистенции и подавался в растворомешалку с дозатором. Раствор использовался с водоцементным (В/Ц) отношением 0,55–0,66 и осадкой конуса 16–18 см. Состав раствора на 1 м³ включал:

- песок средней фракции – 905 кг;
- портландцемент марки Ц400 – 650 кг;
- воду – 445 л;
- суперпластификатор – 6 кг.

Нагнетание раствора производилось с давлением, не превышающим 2–4 атмосферы. Давление повышалось до тех пор, пока не происходил разрыв толщи грунта. Это критическое давление фиксировалось и уточнялось не менее чем по трем контрольным инъекторам. Работы по усилению грунтов основания проводились с давлением, равным рабочему давлению (P_0) или несколько меньшим, до поступления в грунт заданного объема раствора. Качество заполнения и распространения инъекционного раствора в контрольном массиве контролировалось геофизическими методами, такими как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), георадар и др.

Анализируя проектные графики С.Р. Месцяна, А.М. Самедова, Д.В. Ткача (см. рис. 8, 9) и проведя опыт на опытной площадке, мы получили фактический график (рис. 11), который показывает изменение давления при уплотнении в режиме гидроразрыва. Согласно этому графику, давление (P_0) при закачивании раствора в инъектор не было постоянным, а варьировалось в диапазоне от 0,1 до 0,4 МПа.

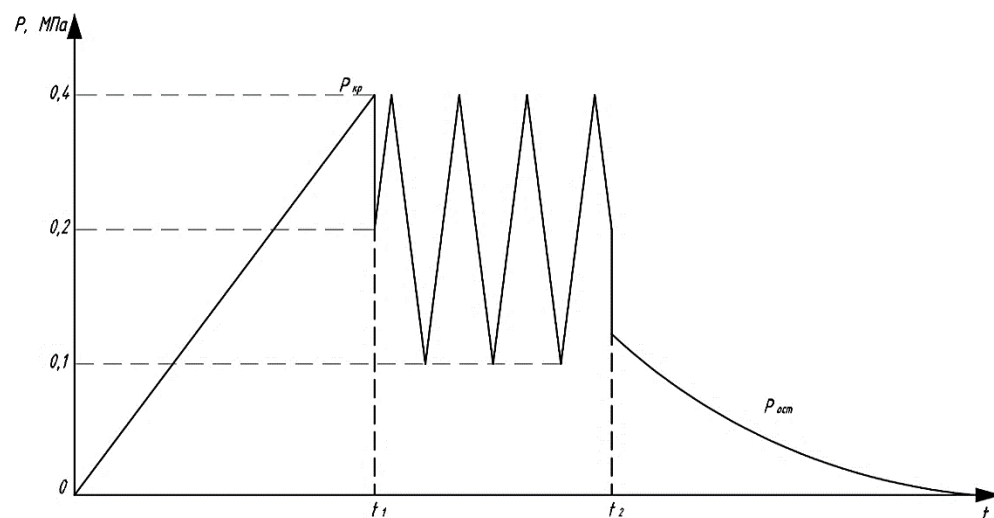


Рис. 11. Фактическая схема уплотнения при гидроразрыве
Fig. 11. Actual scheme of hydraulic fracturing soils

После окончания закачивания раствора в инъектор давление ($P_{ост}$) постепенно снижалось до нуля. Это свидетельствовало о том, что напряженно-де-

формированное состояние грунта ухудшалось из-за ползучести и наличия пустот и полостей в грунте, что подтверждается фотофиксацией и отсутствием раствора в инъекторе (рис. 12).



Рис. 12. Подтверждение отсутствия раствора в инъекторе
Fig. 12. Confirmation of the solution absence in the injector

Заключение

В процессе эксплуатации здания или сооружения НДС грунта может изменяться, стремясь к равновесному состоянию, когда напряжения и деформации стабилизируются. Однако в некоторых случаях, особенно при наличии ползучести, НДС грунта может ухудшаться, что приводит к дополнительным деформациям и потенциальной угрозе для устойчивости конструкции. Это явление может возникать даже при относительно низких напряжениях и приводит к тому, что грунт продолжает деформироваться со временем, даже после прекращения внешнего воздействия. Ползучесть может быть вызвана различными факторами, такими как влажность грунта, температурные изменения, структурные особенности грунта. Ползучесть грунта приводит к тому, что НДС грунта ухудшается, т. к. он продолжает деформироваться, что может привести к увеличению осадок, наклону здания и другим деформациям. Это требует проведения специальных укрепительных мероприятий, таких как дополнительное уплотнение грунта.

Таким образом, ползучесть грунта является одним из ключевых факторов, влияющих на ухудшение НДС грунта, и требует особого внимания при проектировании и укреплении оснований зданий и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Салимова Б.Д. Программа изысканий мостового перехода // Проблемы современной науки и образования. 2021. № 4 (161). С. 34–37.
2. Sadovenko I.O., Puhach A.M., Dereviahina N.I. Investigation of hydrogeomechanical parameters of loess massifs in conditions of technogenic underflooding and development of technical recommendations for strengthening of bases of foundations // Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2019. № 1 (28). P. 173–173.

3. Габуева В.А. Инженерно-геологические изыскания и последствия отказа от них // StudNet : научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей. 2020. № 6. С. 439–443.
4. Власов М.А., Герасимов О.В., Плотников А.В., Простов С.М. Особенности геологического строения участка основания северо-западного обхода г. Кемерово // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 3 (157). С. 4–13.
5. Хайдаршина Э.Т., Загитова Л.Р., Газиев А.Р., Кагирова Р.Р. Инженерно-геологические изыскания в междуречье р. Камы и нижнего течения р. Белой для строительства зданий и сооружений // Вестник Пермского университета. Геология. 2024. № 1 (23). С. 40–45.
6. Аверкина Т.И., Правикова Н.В. Учебная геоинформационная система для анализа опыта инженерно-геологических изысканий // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 137–144.
7. Gabibov F., Aliyev V., Gafarov E., Akhmedova A., Magerramova S. Study of the stability and safety of the dam on lake Boyuk-Shor in Baku // Reliability: Theory and Applications. 2022. № 4 (70). P. 140–145.
8. Бородин В.Н., Курчиков А.Р., Недосекин А.С., Лукашов А.В., Смирнов О.А., Фирстаева Е.Н., Погрецкий А.В. Сейсмогеологическая модель палеозой-мезозойских отложений Белоостровского, Скуратовского и Нямежского лицензионных участков акватории Карского моря по данным сейсморазведки 3D // Геология нефти и газа. 2019. № 1. С. 72–85.
9. Власов М.А., Герасимов О.В., Никулин Н.Ю., Простов С.М. Корректировка сейсмичности участка северо-западного обхода г. Кемерово // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 4 (158). С. 15–25.
10. Nigmatov G., Savinov A., Nigmatov T. Assessment of individual seismic risk for the population, taking into account the actual seismic resistance of buildings and the seismicity of soils // Reliability: Theory and Applications. 2022. № 4 (70). P. 172–179.
11. Нуждин Л.В., Нуждин М.Л. Усиление грунтового основания вертикальным армированием и высоконапорным инъецированием // Усиление оснований и фундаментов : труды VIII Петрухинских чтений. Москва : НИЦ «Строительство», 2024. С. 47–103.
12. Баженова О.Ю., Алексеев В.А. Определение соответствия пригодности смесей на основе микроцементов в технологии цементации по методу инъекционной пропитки // Инновации и инвестиции. 2022. № 12. С. 152–155.
13. Власов М.А., Герасимов О.В., Простов С.М. Корректировка неравномерной осадки фундамента шахтной вентиляционной установки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 5–17.
14. Богомолова Н.Н., Журавлев И.Н. Особенности инженерных изысканий в районах распространения вечной мерзлоты на примере проекта «Северный широтный ход» // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 1. С. 5–14.
15. Власов М.А., Герасимов О.В., Простов С.М. Особенности геологического строения грунтового основания установки главного проветривания строящейся шахты // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 5–21.
16. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. Москва : Минстрой России, 2016. 162 с.
17. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. Москва : Недра, 1985. 342 с.
18. Самедов А.М., Ткач Д.В. Реологическая модель слабого переувлажненного глинистого грунта после закрепления гидравлически активными вяжущими // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 10. С. 82–87.

REFERENCES

1. Salimova B.D. Bridge Crossing Exploration Program. *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya*. 2021; 161 (4): 34–37. (In Russian)
2. Sadovenko I.O., Puhach A.M., Dereviagina N.I. Investigation of hydrogeomechanical of Loess Massifs in Conditions of Technogenic Underflooding and Development of Technical Recommendations for Strengthening of Bases of Foundations. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2019; 28 (1): 173–173.
3. Gabueva V.A. Engineering and Geological Surveys and Consequences of their Abandoning. *StudNet*. 2020; 6: 439–443. (In Russian)

4. Vlasov M.A., Gerasimov O.V., Plotnikov A.V., Prostov S.M. Geological Structure of Base Section of North-Western Bypass in Kemerovo. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023; 3 (157): 4–13. (In Russian)
5. Hajdarshina E.T., Zagitova L.R., Gaziev A.R., Kagirowa R.R. Engineering and Geological Surveys in Interfluvium of the Kama River and the Lower Course of the Belaya River for Building Construction. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 2024; 23 (1): 40–45. (In Russian)
6. Averkina T.I., Pravikova N.V. Educational Geoinformation System for Analyzing Engineering and Geological Survey. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya*. 2022; 5: 137–144. (In Russian)
7. Gabibov F., Aliyev V., Gafarov E., Akhmedova A., Magerramova S. Stability and Safety of the Dam on Lake Boyuk-Shor in Baku. *Reliability: Theory and Applications*. 2022; 70 (4): 140–145.
8. Borodkin V.N., Kurchikov A.R., Nedosekin A.S., Lukashov A.V., Smirnov O.A., Firstaeva E.N., Pogretskii A.V. Geoseismic Model of Palaeozoic-Mesozoic Series According to 3D Seismic Data: Belostrovsky, Skuratovsky, and Nyarmeisky License Areas (Kara Sea waters). *Geologiya nefi i gaza*. 2019; 1: 72–85. (In Russian)
9. Vlasov M.A., Gerasimov O.V., Nikulin N.Y., Prostov S.M. Adjustment of Seismicity of North-Western Bypass Section in Kemerovo. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023; 4 (158): 15–25. (In Russian)
10. Nigmatov G., Savinov A., Nigmatov T. Assessment of Individual Seismic Risk for the Population, Taking into Account Actual Seismic Resistance of Buildings and Soil Seismicity. *Reliability: Theory and Applications*. 2022. 4 (70): 172–179.
11. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L. Foundation Strengthening. In: *Proc. 8th Sci. Conf. 'Petrukhin Readings'*. 2024. Pp. 47–103. (In Russian)
12. Bazhenova O.Yu., Alekseev V.A. Determination of Suitability of Micro-Cement Mixtures in Injection Impregnation Method. *Innovatsii i investitsii*. 2016; 12: 152–155. (In Russian)
13. Vlasov M.A., Gerasimov O.V., Prostov S.M. Correction of Uneven Foundation Precipitation in Shaft Ventilation System. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2025; 4 (170): 5–17. (In Russian)
14. Bogomolova N.N., Zhuravlev I.N. Engineering Surveys in Permafrost Areas in the Northern Latitudinal Railway Project. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2020; 1: 5–14. (In Russian)
15. Vlasov M.A., Gerasimov O.V., Prostov S.M. Geological structure of the Soil Foundation of the Main Ventilation for a Mine. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2025; 2 (168): 5–21. (In Russian)
16. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated Edition of SNiP 2.02.01–83*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2016. 162 p. (In Russian)
17. Meschyan S.R. Experimental Rheology of Clay Soils. Moscow: Nedra, 1985. 342 p. (In Russian)
18. Samedov A.M., Tkach D.V. Rheological Model of Slightly Overmoistened Clay Soil after Stabilization by Active Hydraulic Binding Substances. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014; 6: 82–87. (In Russian)

Сведения об авторах

Власов Максим Алексеевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; ведущий инженер, ООО «ПК «НООСТРОЙ»», 650056, г. Кемерово, ул. Ворошилова, 30, maxsdss@mail.ru

Никулин Николай Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, Кемеровский государственный университет, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6; ведущий инженер-геофизик, ООО «ПК «НООСТРОЙ»», 650056, г. Кемерово, ул. Ворошилова, 30, n.y.nikulin@mail.ru

Герасимов Олег Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; заместитель директора по науке, ООО «НООЦЕНТР», 650056, г. Кемерово, ул. Ворошилова, 30, gerasimov@noocentr.com

Петухов Аркадий Александрович, канд. техн. наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, paa5579@mail.ru

Authors Details

Maksim A. Vlasov, Research Assistant, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesenniyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia; ООО 'NOOSTROY', 30, Voroshilova Str., 650056, Kemerovo, Russia, maxsdss@mail.ru

Nikolay Y. Nikulin, PhD, A/Professor, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., 650000, Kemerovo, Russia; ООО 'NOOSTROY', 30, Voroshilova Str., 650056, Kemerovo, Russia, n.y.nikulin@mail.ru

Oleg V. Gerasimov, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesenniyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia; ООО 'NOOTSENTR', 30, Voroshilov Str., 650056, Kemerovo, Russia, gerasimov@noocentr.com

Arkadii A. Petukhov, PhD, A/Professor, Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia, 13, Kalinin Str., 350044, Krasnodar, Russia, paa5579@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 04.12.2025
Одобрена после рецензирования 24.12.2025
Принята к публикации 12.01.2026

Submitted for publication 04.12.2025
Approved after review 24.12.2025
Accepted for publication 12.01.2026

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

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

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 207–221.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 207–221.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 696.4:536.27; 628.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-207-221

EDN: OOFMRD

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА В ТЕПЛОВОЙ СЕТИ НА ВЫБОР СХЕМЫ ТЕПЛОВОГО ПУНКТА

Татьяна Анатольевна Рафальская

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

Аннотация. *Актуальность.* Снижение расчетной температуры воды в теплосети может привести к существенному увеличению ее расхода. Одной из наиболее эффективных мер для снижения расхода воды в теплосети является увеличение расчетной разности температур воды в системе отопления. Это будет возможно, если снизить расчетную температуру воды в обратной магистрали системы отопления. Известные исследования рассматривают в основном экономическую составляющую такого решения.

Цель работы – исследование возможности сокращения расходов сетевой воды за счет увеличения температурного перепада в системе отопления при обеспечении требуемой температуры внутреннего воздуха помещений.

Материалы и методы. В существующих схемах тепловых пунктов рекомендуется применять двухступенчатые схемы, в которых для предварительного нагрева водопроводной воды на горячее водоснабжение используется теплота обратной магистрали системы отопления. В низкотемпературных системах отопления этой теплоты может быть недостаточно, поэтому более эффективной может оказаться одноступенчатая параллельная схема теплообменников горячего водоснабжения. Расчеты проводились для теплового пункта с различным соотношением расчетных тепловых нагрузок горячего водо-

снабжения и отопления при различных расчетных температурах воды в подающей магистрали теплосети и обратной магистрали системы отопления как для двухступенчатых, так и для одноступенчатых схем теплового пункта.

Результаты исследования позволили выбрать оптимальную схему теплового пункта как по экономическим, так и по теплотехническим показателям, которыми являются расчетное соотношение тепловой мощности горячего водоснабжения и отопления и расчетные температуры воды в тепловой сети.

Выводы. В случае, когда расчетная тепловая нагрузка горячего водоснабжения составляет 40–60 % от нагрузки отопления, лучший температурный режим помещений обеспечит одноступенчатая параллельная схема теплообменников горячего водоснабжения при расчетной температуре воды в обратной магистрали системы отопления 40 °С. Если расчетная нагрузка горячего водоснабжения находится в пределах 60–80 % от нагрузки отопления, рекомендуется применять двухступенчатую смешанную схему при расчетной температуре воды в обратной магистрали 40 °С. При тепловой нагрузке горячего водоснабжения выше 80 % от нагрузки отопления возможно применение двухступенчатой смешанной схемы теплового пункта при расчетной температуре воды в обратной магистрали 70 °С.

Ключевые слова: тепловой пункт, теплообменник, температура внутреннего воздуха, связанная подача теплоты, расход теплоносителя

Для цитирования: Рафальская Т.А. Влияние температурного перепада в тепловой сети на выбор схемы теплового пункта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 207–221. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-207-221. EDN: OOFMRD

ORIGINAL ARTICLE

TEMPERATURE DIFFERENCE EFFECT ON HEAT POINT CIRCUIT IN THE HEATING NETWORK

Tatyana A. Rafalskaya

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

Abstract. Reducing the calculated water temperature in the heating network can lead to a significant increase in its consumption. One of the most effective measures to reduce the water flow rate in the heating network is to increase the calculated difference in water temperatures in the heating system. This is possible if the calculated water temperature in the return line is reduced. The literature mainly considers only the economic component of this solution.

Purpose: Studying the possible reduction in the water flow rate by increasing the temperature difference in the heating network while ensuring the required temperature of internal air in the premises.

Methodology: In heating point circuits, it is recommended to use two-stage circuits in which the return line heat is used to preheat tap water for the hot water supply. In low-temperature heating systems, the return line heat can be insufficient, so a single-stage parallel hot water supply heat exchanger can be more efficient. Calculations are performed for the heating station with the different ratio between the maximum thermal power of hot water supply and heating, different design temperatures of supply and return water for two- and single-stage heat point circuits.

Research findings: In the case when the estimated heat load of hot water supply is 40 to 60 %, the best temperature regime in the premises is provided by a single-stage parallel circuit of hot water supply heat exchangers at 40 °С temperature of return line water in the heating system. If the heating load of the hot water supply ranges from 60 to 80 %, it is advisable to use the two-stage mixed circuit at 40 °С water temperature in the return line. If the heating

load is higher than 80 %, it is possible to use the two-stage mixed circuit at 70 °C water temperature in the return line.

Value: The selected heat point circuit is the best for both economy and thermal engineering, depending on the ratio between the thermal power of hot water supply and heating and calculated temperatures of water in the heating network.

Keywords: heating station, heat exchanger, temperature of internal air, joint heat supply, heat carrier flow rate

For citation: Rafalskaya T.A. Temperature Difference Effect on Heat Point Circuit in the Heating Network. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 207–221. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-207-221. EDN: OOFMRD

Введение

Исторически системы теплоснабжения в нашей стране проектировались на расчетную температуру воды в подающей магистрали тепловой сети 150 °C. В последние десятилетия температура воды в тепловых сетях стала значительно ниже, что связано с остановкой пиковых источников теплоты, значительным износом оборудования и трубопроводов, применением современных теплоизоляционных материалов и ингибиторов внутренней коррозии, эффективных при температуре теплоносителя до 120 °C, а также с возможностью интеграции возобновляемых источников энергии [1]. В отечественных и зарубежных статьях [2, 3] показано, что снижение расчетной температуры воды в теплосети с 115 до 90 °C может увеличить выработку электроэнергии приблизительно на 20 %.

В то же время снижение расчетной температуры воды в подающей магистрали приводит к снижению перепада температур теплоносителя в тепловой сети, следствием чего является увеличение расхода сетевой воды [1, 4], а также повышение температуры воды, возвращаемой в тепловую сеть [4]. Это снижает КПД источника теплоты.

В статье «Выбор оптимального температурного графика системы теплоснабжения по условию минимума годовых эксплуатационных затрат» [4] было показано, что снижение расчетной температуры воды с 150 до 114 °C при регулировании по отопительно-бытовому графику приведет к повышению тарифов на тепловую энергию вследствие увеличения стоимости тепловпотерь трубопроводами и затрат электроэнергии на электропривод насосов, перекачивающих большие объемы воды в тепловой сети.

В работе [5] предлагается снижение расхода воды в теплосети за счет установки баков-аккумуляторов. Но в соответствии с п. 6.19 СП 124.13330.2012 «Тепловые сети» устанавливать баки-аккумуляторы в жилых кварталах не допускается. Кроме того, в системе с баками-аккумуляторами температура возвращаемой воды будет выше, т. к. она меньше будет остывать в первой ступени подогревателя горячего водоснабжения. Поскольку температура обратной воды является важным показателем экономичности системы теплоснабжения, в статье А.А. Середкина [6] сделан вывод о том, что оптимальным решением является ведение автоматического регулирования температуры обратной сетевой воды без учета значения прямой сетевой воды в системе отопления.

Расход воды в тепловой сети складывается из расходов воды на отопление (вентиляцию) и горячее водоснабжение. Уменьшить расход сетевой воды возможно за счет увеличения разницы температур воды в системе отопления. Например, предлагается снизить расчетную температуры воды после системы отопления

$$G = Q / [c(t_{p1} - t_{p2})],$$

где G – расход воды в тепловой сети, кг/с; Q – тепловая мощность, Вт; c – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); t_{p1} , t_{p2} – температуры теплоносителя в подающей и обратной магистралях тепловой сети, °C.

Эта мера во многих источниках [1, 2, 7–11] считается наиболее эффективной, поскольку снижаются тепловые потери в трубопроводах, увеличивается КПД теплоисточника, т. к. при снижении температуры возвращаемой воды необходимый расход пара на ее нагрев увеличивается, повышается нагрузка отопительного отбора, снижается доля работы турбины по конденсационному циклу, что и приводит к повышению общего КПД [2, 10, 11]; кроме того, снижение расхода воды приводит к уменьшению затрат электроэнергии на привод сетевых насосов [1, 9, 10].

В качестве одного из возможных решений можно рассмотреть расширенный температурный график [7, 12], в котором увеличение количества теплоты происходит за счет повышения температуры и увеличения температурного перепада в системе отопления. Здесь при понижении температуры наружного воздуха увеличение отпуска тепла происходит за счет повышения температуры воды при минимально возможном по условию устойчивости системы отопления расходе воды, а когда температура подаваемой воды достигает максимального значения по санитарно-гигиеническим требованиям, она остается постоянной, но увеличивается расход воды.

Однако, как отмечают авторы в работе [12], даже при переходе на расширенные температурные графики с пониженной до 110 °C расчетной температурой воды при максимальных допустимых диаметрах трубопроводов расход электроэнергии оказывается все равно существенно выше, чем при графиках с максимальной температурой сетевой воды 150 °C.

Подобные проблемы характерны и для зарубежных систем теплоснабжения. Так, в Финляндии предложен температурный график с увеличенным температурным перепадом для системы отопления, по сравнению с традиционным графиком, для сокращения расхода воды при снижении ее расчетной температуры [8, 13].

Аналогичные решения применяются в работе [2] (г. Линчёпинг, Швеция) и в [14] (г. Лудза, Латвия), но здесь при снижении расчетной температуры воды в подающей магистрали предлагается сохранить тот же перепад температур, что и в высокотемпературном графике, чтобы не допустить увеличения расходов теплоносителя.

К достоинствам низкотемпературных систем отопления обычно относят увеличение площади отопительных приборов до двух раз, которые при расположении по всей длине окон равномернее обогревают помещение. К недостат-

кам можно отнести повышенную металлоемкость и стоимость. К тому же в этих случаях необходимо менять системы отопления потребителей или применять такие способы регулирования только для нового строительства.

В ряде исследований [15, 16] предпринимались попытки найти оптимальные расчетные температуры воды в подающей и обратной магистралях системы теплоснабжения исходя из минимума капитальных и эксплуатационных затрат. Но во всех изученных работах рассматриваются только экономические проблемы; не анализируется влияние работы системы горячего водоснабжения на систему отопления. Исследование возможности сокращения расходов воды в теплосети за счет увеличения температурного перепада в системе отопления при обеспечении оптимальной температуры внутреннего воздуха помещений является целью настоящей работы.

Материалы и методы

В существующих схемах тепловых пунктов (ТП) при соотношении расчетной тепловой мощности горячего водоснабжения и отопления $\psi = Q_{h\max}/Q_{o\max}$ от 0,2 до 1,2 рекомендуется применять двухступенчатые схемы присоединения подогревателей системы горячего водоснабжения (СГВ). Ниже показаны температуры t и расходы G теплоносителей (рис. 1).

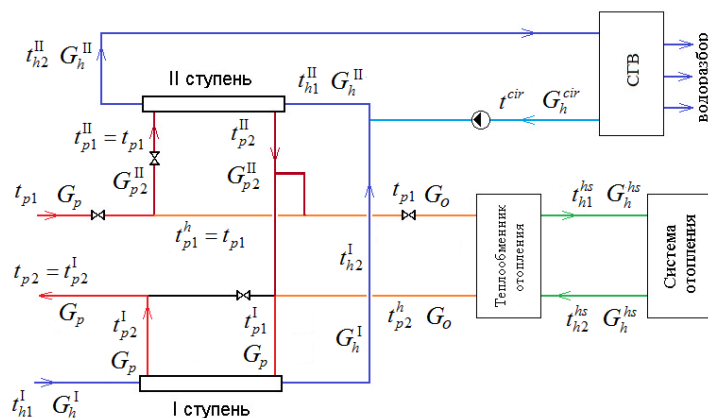


Рис. 1. Двухступенчатая схема теплового пункта

Fig. 1. Two-stage circuit of the heat point

В этой схеме ТП для предварительного нагрева водопроводной воды на горячее водоснабжение в первой ступени теплообменника используется теплота обратной магистрали. В низкотемпературных системах отопления этой теплоты может быть недостаточно, поэтому более эффективной может оказаться одноступенчатая параллельная схема теплообменников СГВ.

Рассматривались три варианта схемы теплового пункта.

Первый вариант – двухступенчатая схема присоединения подогревателей горячего водоснабжения с ограничением расхода сетевой воды, с расчетной температурой воды в обратной магистрали системы отопления $t_{p2}^h = 70$ °С.

Второй вариант – та же схема с расчетной температурой воды в обратной магистрали системы отопления $t_{p2}^h = 40^\circ\text{C}$.

Третий вариант – одноступенчатая параллельная схема присоединения подогревателя горячего водоснабжения с ограничением расхода сетевой воды, с расчетной температурой воды в обратной магистрали системы отопления $t_{p2}^h = 40^\circ\text{C}$. Эта схема тоже работает по принципу «связанного» регулирования теплоты, рассчитывается так же, как и двухступенчатая схема, но без первой ступени теплообменника.

На рис. 2 показаны суммарные (на отопление и горячее водоснабжение) расходы сетевой воды G_p для ТП с максимальной тепловой мощностью отопления $Q_{\text{отmax}} = 2,2$ МВт и максимальной тепловой мощностью горячего водоснабжения $Q_{\text{гвmax}}$, составляющей $\psi = 0,6$ от нагрузки отопления.

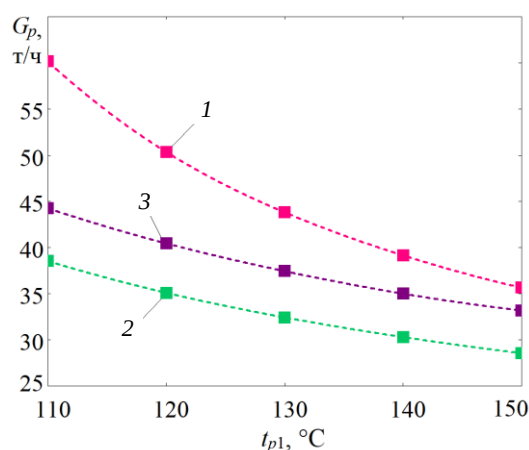


Рис. 2. Расходы воды в тепловой сети для трех вариантов в зависимости от расчетной температуры воды ($\psi = 0,6$)

Fig. 2. Flow rates of heat supply water for three options, depending on the calculated water temperature ($\psi = 0,6$)

В первом варианте при снижении расчетной температуры воды в подающей магистрали теплосети t_{p1} с 150 до 110 $^\circ\text{C}$ при одинаковой расчетной температуре воды после системы отопления $t_{p2}^h = 70^\circ\text{C}$ суммарный расход сетевой воды вырастет на 60 % (линия 1).

Второй вариант предусматривает увеличение температурного перепада для системы отопления за счет снижения расчетной температуры воды в обратной магистрали системы отопления до $t_{p2}^h = 40^\circ\text{C}$, что позволяет существенно снизить суммарный расход сетевой воды (линия 2).

В третьем варианте расход сетевой воды будет выше, чем во втором варианте, за счет того, что не используется теплота обратной магистрали, но все же существенно ниже, чем в первом варианте (линия 3).

Моделирование режимов работы ТП выполнялось для различного соотношения ψ , схем присоединения теплообменников (двухступенчатой и одноступенчатой) и расчетных температур воды в подающей и обратной магистралях теплосети. Методика моделирования подробно описана в статье [17]. Результатами расчетов является распределение температуры, расходов и тепловой мощности систем в течение отопительного периода, характеризующегося наружной температурой t_{ext} . Один из вариантов расчета для условий $t_{p1} = 120^\circ\text{C}$ и $\psi = 0,6$ показан на рис. 3.

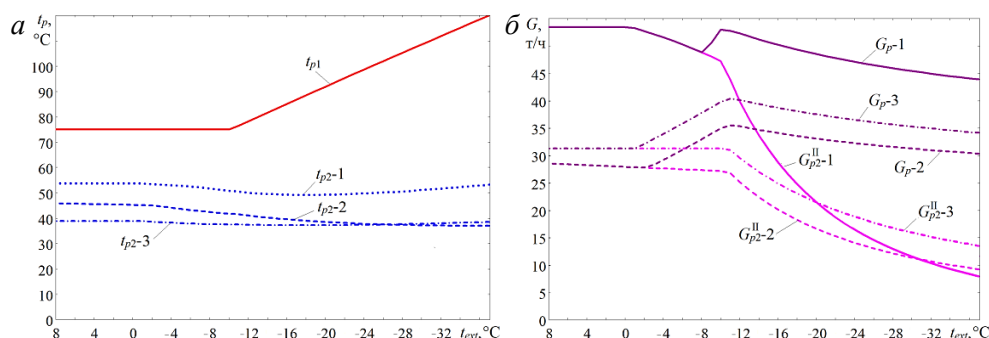


Рис. 3. Режимы работы теплового пункта с $t_{p1} = 120^\circ\text{C}$ и $\psi = 0,6$:

a – температуры сетевой воды; b – расходы сетевой воды

Fig. 3. Operating modes of the heating station at $t_{p1} = 120^\circ\text{C}$ and $\psi = 0.6$:

a – temperatures of network water; b – flow rates of network water

В первом варианте расчетная температура воды в обратной магистрали системы отопления выше, чем в вариантах 2 и 3, поэтому и температура воды, возвращаемой в тепловую сеть t_{p2} , тоже выше (рис. 3, a). Также можно обнаружить (рис. 3, b), как меняются расходы воды во второй ступени подогревателя горячего водоснабжения G_{p2}^{II} и суммарный расход воды в теплосети G_p . Суммарный расход сетевой воды в первом варианте на 63 % превышает расход сетевой воды во втором и на 35 % в третьем варианте в течение всего отопительного периода. По рассчитанным температурам и расходам воды определялась тепловая мощность систем отопления и горячего водоснабжения в режиме максимального водопотребления в СГВ, т. е. при максимальной тепловой мощности теплообменника СГВ II ступени. Суточное изменение водопотребления в СГВ задавалось типовым графиком изменения относительной тепловой мощности горячего водоснабжения II ступени $\bar{Q}_h^{\text{II}}$, в течение каждого часа z , показанным на рис. 4.

В первом варианте расчетная температура воды в обратной магистрали системы отопления получается выше, чем в вариантах 2 и 3, следовательно, и температура воды, возвращаемой в тепловую сеть t_{p2} , тоже будет выше (рис. 3, a). Кроме того, можно обнаружить изменение расхода воды во второй

ступени подогревателя горячего водоснабжения G_{p2}^{II} и суммарного расхода воды в теплосети G_p (рис. 3, б). Суммарный расход сетевой воды в первом варианте на 63 % превышает расход сетевой воды во втором и на 35 % в третьем варианте в течение всего отопительного периода. По рассчитанным температурам и расходам воды определялась тепловая мощность систем отопления и горячего водоснабжения в режиме максимального водопотребления в СГВ, когда тепловая мощность теплообменника СГВ II ступени максимальна. Суточное изменение водопотребления в СГВ задавалось типовым графиком изменения относительной тепловой мощности горячего водоснабжения II ступени $\bar{Q}_h^{\text{II}}$ в течение каждого часа τ (рис. 4).

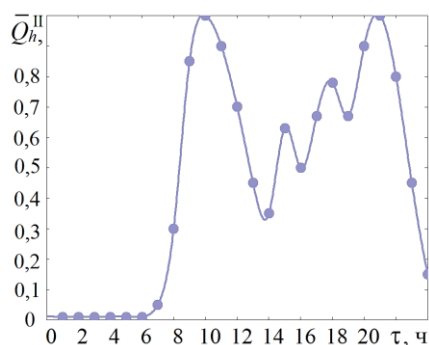


Рис. 4. Суточное изменение относительной тепловой мощности подогревателя горячего водоснабжения II ступени

Fig. 4. Daily change in relative thermal power of the 2nd stage of hot water heater

Количество тепла, поступающего в систему отопления в течение суток, вследствие влияния работы подогревателя горячего водоснабжения определялось по рис. 4 как

$$Q_o = Q_{o\min} + Q_h^{\text{II}} \left(1 - \bar{Q}_h^{\text{II}}\right).$$

Текущая температура внутреннего воздуха за каждый период времени $\tau = 1$ ч будет зависеть от переменной теплоотдачи отопления вследствие изменения температуры наружного воздуха t_{ext} , суточного изменения тепловой мощности подогревателя II ступени СГВ и тепловой аккумуляции помещений:

$$t_{\text{int}}(\tau) = t_{\text{ext}} + \left[\frac{Q_o}{Q_o^{\text{req}}} + \left(\frac{t_{\text{int}}^{\text{cur}} - t_{\text{ext}}}{t_{\text{int}}^{\text{req}} - t_{\text{ext}}} - \frac{Q_o}{Q_o^{\text{req}}} \right) e^{\frac{-\tau}{\beta}} \right] (t_{\text{int}}^{\text{req}} - t_{\text{ext}}),$$

где $t_{\text{int}}^{\text{cur}}$ — температура внутреннего воздуха к концу каждого часа; $t_{\text{int}}^{\text{req}}$ — расчетная температура внутреннего воздуха, 18 °С; Q_o^{req} — количество тепла, требуемое для системы отопления при текущей наружной температуре; β — коэффициент тепловой аккумуляции помещений, принимался 77,8 ч.

Изменение наружной температуры задавалось по архивным данным о погоде в г. Новосибирске. Исследовался диапазон наружных температур t_{ext} от -5 до -32 °C с 13 по 19 февраля 2024 г. (рис. 5).

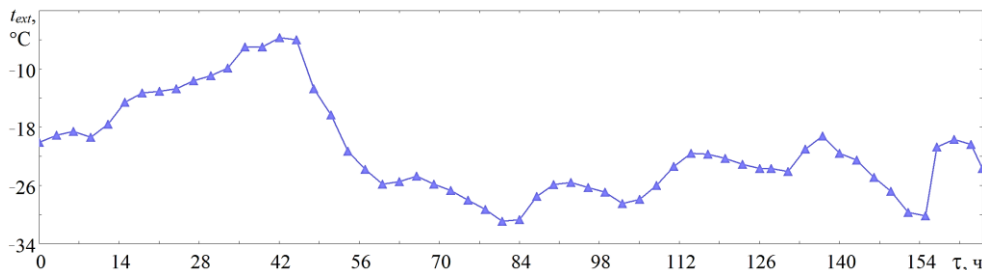


Рис. 5. Изменение температуры наружного воздуха
Fig. 5. Change in external air temperature

Расчеты проводились для ТП с максимальной тепловой мощностью отопления $Q_{omax} = 2,2$ МВт, но с различной максимальной Q_{hmax} и средней Q_{hm} тепловой мощностью СГВ. Один из результатов расчета температуры внутреннего воздуха t_{int} для $t_{p1} = 120$ °C и $\psi = 0,6$ показан ниже (рис. 6).

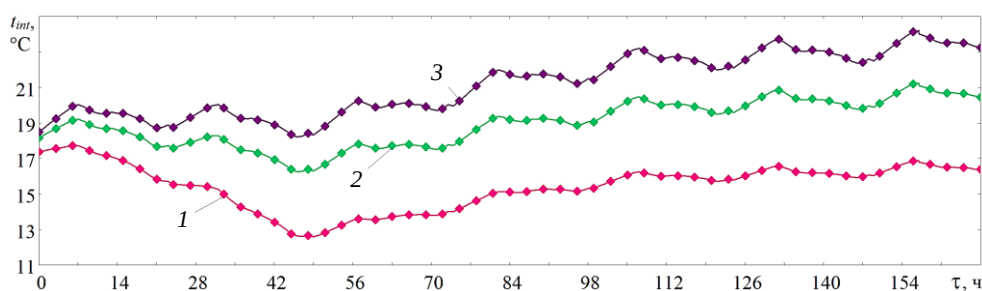


Рис. 6. Температура внутреннего воздуха при $t_{p1} = 120$ °C (1, 2, 3 – номера вариантов)
Fig. 6. Temperature of internal air at $t_{p1} = 120$ °C (1, 2, 3 – numbers of variants)

В первом варианте внутренняя температура будет ниже допустимой. При наружных температурах, соответствующих окрестности точки излома температурного графика ($-6 \dots -12$ °C), она может достигать $12,5 \dots 13$ °C. Во втором варианте внутренняя температура будет несколько выше ($18 \dots 22$ °C). Оптимальную внутреннюю температуру ($19 \dots 24$ °C) может обеспечить третий вариант, но в этом случае расход воды в теплосети будет выше, чем в варианте два (рис. 3, б).

Обсуждение результатов

Результаты расчета осредненной внутренней температуры сведены в табл. 1, где q_{hr}^h и q_{Tm}^h – максимальный и средний расходы нагреваемой водопроводной воды на горячее водоснабжение. Голубым цветом выделены диапазоны, соот-

ветствующие допустимым и оптимальным значениям средней внутренней температуры. Чем ниже расчетная температура воды в подающей магистрали теплотосети t_{p1} , тем ниже средняя t_{int} , но чем больше расчетная тепловая мощность горячего водоснабжения (больше ψ), тем выше t_{int} . При низком отношении $\psi = 0,2$ в любом варианте t_{int} будет ниже допустимой. При $\psi > 0,6$ и $t_{p2} = 40^\circ\text{C}$ помещения будут перегреваться.

Таблица 1

Результаты расчета внутренней температуры помещений

Table 1

Calculated internal temperature in premises

t_{p1} , °C	t_{int}^1 , °C	t_{int}^2 , °C	t_{int}^3 , °C	G_{p1} , т/ч	G_{p2} , т/ч	G_{p3} , т/ч	Q_{hmax} , кВт	Q_{hm} , кВт	q_{hr}^h , м³/ч	q_{Tm}^h , м³/ч	ψ
150	16,93	17,05	17,73	27,68	21,01	22,55	440	188	5,6	2,0	0,2
140	16,10	16,19	17,02	31,10	22,73	24,38					
130	14,98	15,10	16,16	35,67	24,85	26,53					
120	13,33	13,68	15,08	42,07	27,50	29,28					
110	11,12	11,81	13,69	51,66	30,90	32,80					
150	18,47	19,80	20,91	31,66	24,77	27,85	880	377	11,2	4,0	0,4
140	17,45	18,81	20,02	35,12	26,51	29,64					
130	16,09	17,58	18,98	39,74	28,63	31,97					
120	14,23	15,97	17,70	46,21	31,29	34,85					
110	11,75	13,86	16,10	55,90	34,71	38,52					
150	20,26	22,76	24,24	35,63	28,53	33,16	1320	565	16,8	6,0	0,6
140	19,09	21,69	23,24	39,13	30,28	34,98					
130	17,53	20,36	22,08	43,80	32,41	37,42					
120	15,49	18,62	20,62	50,34	35,08	40,43					
110	12,78	16,32	18,80	60,14	38,51	44,23					
150	22,20	25,84	27,65	39,59	32,29	38,47	1760	754	22,4	8,0	0,8
140	20,87	24,73	26,55	43,15	34,05	40,32					
130	19,14	23,31	25,28	47,86	36,19	42,88					
120	16,95	21,44	23,67	54,47	38,87	46,00					
110	14,03	18,99	21,65	64,38	42,31	49,94					
150	24,39	28,77	31,08	43,57	36,06	43,78	2200	942	28,0	10,0	1,0
140	22,87	27,82	29,90	47,16	37,82	45,66					
130	20,86	26,36	28,54	51,93	39,97	48,33					
120	18,52	24,40	26,80	58,35	42,66	51,58					
110	15,41	21,82	24,60	68,62	46,12	55,66					
150	26,42	30,55	34,53	47,54	39,82	49,09	2640	1130	33,6	12,0	1,2
140	25,02	30,64	33,27	51,16	41,59	50,99					
130	22,83	29,46	31,83	55,99	43,75	53,78					
120	20,18	27,44	29,97	62,75	46,46	57,16					
110	16,89	24,75	27,52	72,86	49,92	60,89					

Таким образом, при большом соотношении тепловых нагрузок (более 1,0...1,2) рационально применять двухступенчатую схему теплового пункта с расчетной температурой в обратной магистрали 70 °С. Расходы воды в теплосети будут выше, чем для других вариантов, но не потребуются менять систему отопления. При соотношении тепловых мощностей 0,6...0,8 лучше всего применять двухступенчатую схему теплового пункта с расчетной температурой в обратной магистрали 40 °С, а при соотношении тепловых мощностей 0,4...0,6 оптимальную внутреннюю температуру сможет обеспечить одноступенчатая схема с расчетной температурой воды в обратной магистрали 40 °С.

Определим теперь количество трубчатых теплообменников с наружным диаметром D_{out} в первой z^I и второй z^{II} ступенях для каждого варианта в зависимости от расчетной тепловой мощности первой Q_h^I и второй Q_h^{II} ступеней при различных ψ . Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Распределение тепловой мощности и количества теплообменников
между ступенями подогревателей горячего водоснабжения**

Table 2

**Distribution of thermal power and number of heat exchangers between stages
of hot water heaters**

t_{p1} , °C	Q_h^I , Вт			Q_h^{II} , Вт			z^I , шт.			z^{II} , шт.			D_{out} , мм	ψ
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
150	218,9	135,6	–	221,1	304,4	440	2	1	–	2	3	4	114	0,2
140	229,5	139,9		210,5	300,1		2	1		2	3	4		
130	241,8	144,8		198,2	295,2		2	1		2	3	3		
120	256,5	150,5		183,5	289,5		2	1		2	3	3		
110	274,3	157,2		165,7	282,8		2	1		2	3	3		
150	437,8	271,2	–	442,2	608,8	880	2	2	–	3	4	5	168	0,4
140	458,9	279,8		421,1	600,2		2	2		3	4	5		
130	483,5	289,6		396,5	590,4		2	2		3	4	4		
120	513,0	300,9		367,0	579,1		2	2		2	4	4		
110	548,5	314,3		331,5	565,7		2	2		2	3	4		
150	656,7	406,8	–	663,3	913,2	1320	3	3	–	4	6	7	168	0,6
140	688,4	419,7		631,6	900,3		3	3		4	6	7		
130	725,3	434,4		594,7	885,6		3	3		3	5	6		
120	769,5	451,4		550,5	868,6		3	2		3	5	6		
110	822,8	471,5		497,2	848,5		3	2		3	5	6		
150	875,6	542,4	–	884,4	1217,6	1760	4	3	–	4	7	7	219	0,8
140	917,8	559,6		842,2	1200,4		4	3		4	6	7		
130	967,1	579,1		792,9	1180,9		3	3		4	6	7		
120	1025,9	601,8		734,1	1158,2		3	3		3	5	6		
110	1097,1	628,6		662,9	1131,4		3	3		3	5	6		

Окончание табл. 2
End of table 2

t_{p1} , °C	Q_h^I , Вт			Q_h^{II} , Вт			z^I , шт.			z^{II} , шт.			D_{out} , мм	ψ
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
150	1094,5	678,0	–	1105,5	1522,0	2200	5	5	–	5	9	9	219	1,0
140	1147,3	699,5		1052,7	1500,5		5	4		5	8	9		
130	1208,8	723,9		991,2	1476,1		4	4		4	8	8		
120	1282,4	752,3		917,6	1447,7		4	4		4	7	8		
110	1371,3	785,8		828,7	1414,2		4	3		3	6	7		
150	1313,4	813,6	–	1326,6	1826,4	2640	5	5	–	5	8	8	273	1,2
140	1376,7	839,4		1263,3	1800,6		4	4		4	7	7		
130	1450,6	868,7		1189,4	1771,3		4	4		4	7	7		
120	1538,9	902,7		1101,1	1737,3		4	3		3	6	6		
110	1645,6	943,0		994,4	1697,0		3	3		3	5	6		

Во всех вариантах при снижении расчетной температуры воды в подающей магистрали теплосети уменьшается количество теплообменников, поскольку увеличивается суммарный расход воды в теплосети.

В первом варианте при снижении расчетной температуры воды в подающей магистрали увеличивается как расход, так и температура сетевой воды на входе в теплообменник из-за того, что точка излома приходится на более низкую температуру наружного воздуха. Это приводит к уменьшению площади теплообменника первой ступени, несмотря на увеличение его тепловой мощности.

Во втором варианте общий расход воды в теплосети меньше, поэтому количество ступеней в теплообменниках будет больше, чем в варианте один, и стоимость их будет выше.

В третьем варианте количество ступеней теплообменников будет меньше, чем во втором варианте, из-за большего суммарного расхода воды в теплосети, а также за счет более полного использования площади теплообменника в одной ступени, т. е. меньшего запаса поверхности.

Таким образом, в первом варианте будут большие эксплуатационные затраты вследствие большого расхода воды, но небольшие капитальные затраты, т. к., несмотря на то, что необходимое количество секций подогревателей не меньше, чем в третьем варианте, затраты на систему отопления будут существенно ниже. Второй вариант будет характеризоваться меньшим расходом сетевой воды, но большей стоимостью оборудования системы отопления и теплового пункта, чем в первом и третьем вариантах. Наиболее экономичным будет третий вариант.

Заключение

Проведенное исследование позволило выбрать схему теплового пункта, оптимальную не только с экономической, но и с теплотехнической стороны, в зависимости от расчетной тепловой мощности горячего водоснабжения

и отопления и расчетных температур воды в теплосети. Основным критерием выбора схемы теплового пункта должна быть способность системы отопления поддерживать требуемую температуру внутреннего воздуха помещений.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. При небольшой расчетной тепловой мощности горячего водоснабжения $\psi = Q_{hmax}/Q_{omax} = 0,2...0,4$ и расчетной температуре воды в обратной магистрали $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ связанная подача теплоты при двухступенчатой смешанной схеме теплообменников горячего водоснабжения не применима. Такая схема обеспечит допустимую температуру внутреннего воздуха только при $\psi = 0,4$ и $t_{p1} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, но такая температура воды в подающей магистрали тепловой сети в настоящее время не поддерживается.

2. При наиболее характерном для жилых районов $\psi = 0,6$ лучший температурный режим помещений будет обеспечен при применении одноступенчатой параллельной схемы теплообменников горячего водоснабжения, работающей по принципу связанного регулирования, с расчетной температурой воды в обратной магистрали системы отопления $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. При повышении доли тепловой мощности горячего водоснабжения до $\psi = 0,8$ лучше применять двухступенчатую смешанную схему теплообменников горячего водоснабжения при расчетной температуре воды в обратной магистрали системы отопления $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. При высокой тепловой мощности горячего водоснабжения $\psi = 1,0...1,2$ возможно применение двухступенчатой смешанной схемы теплообменников горячего водоснабжения при расчетной температуре воды в обратной магистрали системы отопления $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $t_{p1} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ – с расчетной температурой воды в обратной магистрали $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Brange L., Lauenburg P., Sernhed K., Thern M. Bottlenecks in district heating networks and how to eliminate them – A simulation and cost study // *Energy*. 2017. P. 1–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.097>
2. Rosén T., Ödlund L. Active Management of Heat Customers Towards Lower District Heating Return Water Temperature // *Energies*. 2019. V. 12. P. 1863. DOI: 10.3390/en12101863
3. Беляев А.С., Горбатова Е.К., Мухин Н.В. Оценка целесообразности снижения температурного графика тепловых сетей ТЭЦ // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2012. № 6 (80). С. 43–45. EDN: NXEOPM
4. Рафальская Т.А., Рудяк В.Я., Филатова Т.М. Выбор оптимального температурного графика системы теплоснабжения по условию минимума годовых эксплуатационных затрат // *Известия вузов. Строительство*. 2021. № 4. С. 48–64. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-748-4-48-64. EDN: CRZOHM
5. Rebollar J.V., Himpe E., Laverge J., Janssens A. Influence of recirculation strategies in collective heat distribution system on the performance of dwelling heating substations // *Proc. VIII Int. Conf. for Renewable Energy, Energy Saving and Energy Education*. 2015. P. 1–10.
6. Середкин А.А., Кобылкин М.В., Риккер Ю.О. Анализ режимных параметров системы отопления с целью разработки оптимального метода местного регулирования подачи тепла // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2023. Т. 8. № 2 (32). С. 115–123. DOI: 10.25744/genb.2023.83.88.015. EDN: QYAFCV
7. Суворов Д.М., Татаринова Н.В. Эффективность работы ТЭЦ в системах теплоснабжения при переходе на пониженные и расширенные графики регулирования // *Проблемы реги-*

- ональной энергетики. 2022. № 3 (55). С. 68–82. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.4-52.10. EDN: CNKJNP
8. Laajalehto T., Kuosa M., Mäkilä T., Lampinen M., Lahdelma R. Energy efficiency improvements utilising mass flow control and a ring topology in a district heating network // *Applied Thermal Engineering*. 2014. V. 69. P. 86–95.
 9. Pirouti M., Bagdanavicius A., Ekanayake J., Wu J., Jenkins N. Energy consumption and economic analyses of a district heating network // *Energy*. 2013. V. 57. P. 149–159.
 10. Gustafsson J., Delsing J., Deventer J. Improved district heating substation efficiency with a new control strategy // *Applied Energy*. 2010. V. 87. P. 1996–2004.
 11. Малая Э.М., Спиринов А.В., Культивев С.Г. Оптимизация температурных и гидравлических параметров тепловых сетей // *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*. 2011. Вып. 3. С. 24–33. EDN: OCDXPR
 12. Суворов Д.М., Татаринова Н.В., Лыскова Е.А. Эффективность расширенных графиков регулирования отопления на ТЭЦ при понижении расчетной температуры прямой сетевой воды // *Проблемы региональной энергетики*. 2021. № 4(52). С. 99–114. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.4-52.10. EDN: GFSVHF
 13. Kuosa M., Kontu K., Mäkilä T., Lampinen M., Lahdelma R. Static study of traditional and ring networks and the use of mass flow control in district heating applications // *Applied Thermal Engineering*. 2013. V. 54. P. 450–459.
 14. Vigants G., Blumberga D. Modelling of the District Heating System's Operation // *Scientific Journal of Riga Technical University*. 2011. V. 6. P. 132–137. DOI: 10.2478/v10145-011-0019-x
 15. Garbai L., Jasper A., Santa R. Optimization of the operation of existing district heating systems // *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 2023. V. 15. № 2. P. 1–10. DOI: 10.1556/1848.2023.00692
 16. Мельник И.А., Манзарханова Л.М. Влияние температурного графика теплоснабжения на эксергетический баланс здания // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2014. № 6 (11). С. 68–73. EDN: THNUFF
 17. Рафальская Т.А. Обоснование применения центрального регулирования по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения в условиях низкотемпературного теплоснабжения // *Известия вузов. Строительство*. 2025. № 5. С. 116–130. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-797-5-116-130. EDN: OIRWAM

REFERENCES

1. Brange L., Lauenburg P., Sernhed K., Thern M. Bottlenecks in District Heating Networks and how to Eliminate Them A Simulation and Cost Study. *Energy*. 2017; 1–10. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.097
2. Rosén T., Ödlund L. Active Management of Heat Customers Towards Lower District Heating Return Water Temperature. *Energies*. 2019; 12: 1863. DOI: 10.3390/en12101863
3. Belyaev A.S., Gorbatoва E.K., Mukhin N.V. Feasibility Assessment of Reducing Temperature Schedule in Thermal Networks of Thermal Power Plants. *Energobezrezheniye i vodopodgotovka*. 2012; (6 (80)): 43–45. (In Russian)
4. Rafalskaya T.A., Rudyak V.Ya., Filatova T.M. Optimum Temperature Selection for Heat Supply System at Minimum Annual Operating Costs. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2021; (4): 48–64. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-748-4-48-64 (In Russian)
5. Rebollar J.V., Himpe E., Laverge J., Janssens A. Influence of Recirculation Strategies in Collective Heat Distribution System on Performance of Dwelling Heating Substations. In: *Proc. 8th Int. Conf. 'Renewable Energy, Energy Saving and Energy Education'*. 2015. Pp. 1–10. Available: <https://biblio.ugent.be/publication/7036593>
6. Seredkin A.A., Kobylkin M.V., Rikker Yu.O. Analysis of Mode Parameters of Heating System in Developing the Optimum Control for Local Heat Supply. *Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten'*. 2023; 8 (2 (32)): 115–123. DOI: 10.25744/genb.2023.83.88.015 (In Russian)
7. Suvorov D.M., Tatarinova N.V. Efficiency of CHPP Operation in Heat-Supply Systems in Transition to Lowered and Extended Schedules of Heating Regulation. *Problemy regional'noy energetiki*. 2022; (3 (55)): 68–82. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.4-52.10 (In Russian)

8. Laajalehto T., Kuosa M., Mäkilä T., Lampinen M., Lahdelma R. Energy Efficiency Improvements Utilising Mass Flow Control and a Ring Topology in a District Heating Network. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 69: 86–95.
9. Pirouti M., Bagdanavicius A., Ekanayake J., Wu J., Jenkins N. Energy Consumption and Economic Analyses of a District Heating Network. *Energy*. 2013; 57: 149–159.
10. Gustafsson J., Delsing J., Deventer J. Improved District Heating Substation Efficiency with a New Control Strategy. *Applied Energy*. 2010; 87: 1996–2004.
11. Malaya E.M., Spirin A.V., Kulyaev S.G. Optimization of Thermal and Hydraulic Parameters of Heat Networks. *Nauchnyy vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2011; 3 (23): 24–33. (In Russian)
12. Suvorov D.M., Tatarinova N.V., Lyskova E.A. Effectiveness of Extended Circuits of Heating Regulation at CHP Plants with Decreasing Normative Design Temperature of Supply Water. *Problemy regional'noy energetiki*. 2021; (4 (52)): 99–114. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.4-52.10 (In Russian)
13. Kuosa M., Kontu K., Mäkilä T., Lampinen M., Lahdelma R. Static Study of Traditional and Ring Networks and the use of Mass Flow Control in District Heating Applications. *Applied Thermal Engineering*. 2013; 54: 450–459.
14. Vigants G., Blumberga D. Modelling of the District Heating System's Operation. *Scientific Journal of Riga Technical University*. 2011; 6: 132–137. DOI: 10.2478/v10145-011-0019-x
15. Garbai L., Jasper A., Santa R. Optimization of the Operation of Existing District Heating Systems. *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 2023: 1–10. DOI: 10.1556/1848.2023.00692
16. Melnik I.A., Manzarkhanova L.M. Impact of Heating Circuit Temperature on Energy Balance of Building. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2014; (6 (11)): 68–73. (In Russian)
17. Rafalskaya T.A. Rationale for Central Regulation of Joint Heating and Hot Water Supply Loads in Low-Temperature Heat Supply Conditions. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2025; (5): 116–130. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-797-5-116-130 (In Russian)

Сведения об авторе

Рафальская Татьяна Анатольевна, докт. техн. наук, профессор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, rafalskaya.ta@yandex.ru

Author Details

Tatyana A. Rafalskaya, DSc, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, rafalskaya.ta@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 05.07.2025
Одобрена после рецензирования 06.11.2025
Принята к публикации 10.11.2025

Submitted for publication 05.07.2025
Approved after review 06.11.2025
Accepted for publication 10.11.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 222–237.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 222–237.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697.13 + 699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-222-237

EDN: PQTKAL

РОЛЬ ТРАНСМИССИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА ЗДАНИЙ С ГРУНТОВЫМИ ОСНОВАНИЯМИ В ФОРМИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ В РЕАЛЬНЫХ ВНЕШНИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Евгений Владимирович Левин, Александр Юрьевич Окунев

*Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук,
г. Москва, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Одной из задач при строительстве и эксплуатации жилых и общественных зданий является обеспечение нормативных требований к тепловому микроклимату помещений. Его текущее состояние зависит от теплообмена здания с внешней средой и от используемого климатического оборудования. При этом теплообмен с внешней средой зависит от постоянно меняющихся внешних условий: температуры воздуха, прямой и рассеянной солнечной радиации, лучистого теплообмена с окружающими объектами, а также от нестационарного теплопереноса через грунтовые основания. Все это необходимо учитывать при эксплуатации инженерных климатических систем с целью обеспечения требуемых показателей теплового микроклимата помещений.

Цель работы: сравнение теплопотерь в течение годового цикла эксплуатации здания через ограждающие конструкции помещений, контактирующих и не контактирующих с грунтовыми основаниями. Задачей данных исследований являлось определение вклада величины теплопотерь через грунтовые основания в общие теплопотери через несветопрозрачные ограждающие конструкции.

Методы. Исследования проведены постановкой вычислительных экспериментов с определением нестационарных величин теплообмена помещений с окружающей средой. Использована краевая задачи нестационарного теплопереноса, записанная в параметрическом виде и содержащая варьируемые критерии подобия.

Результаты. Исследования выполнены с использованием архивных метеорологических данных для г. Москвы за 2011 г. Установлено влияние теплообмена с грунтовым основанием на общий нестационарный теплообмен помещения для различных календарных сезонов, а также для различной ориентации наружной ограждающей конструкции помещения по сторонам света. Показано, что контакт помещения с грунтовым основанием приводит к увеличению средних за календарные сезоны теплопотерь, причем независимо от ориентации по сторонам света и параметров ограждающих конструкций. Минимальное увеличение относительных тепловых потерь (не более 18 %) имеет место зимой. Максимальное влияние контакта помещений с грунтовым основанием имеет место в летний период. Теплопотери по сравнению с не контактирующими с грунтом помещениями увеличиваются до 4 раз, и в зависимости от типа ограждающей конструкции на южном фасаде они могут оказаться до 2 раз выше, чем на северном. Для помещений, кон-

тактирующих с грунтовыми основаниями, средние за сезоны амплитуды суточных изменений теплопотерь снижаются для всех типов ограждающих конструкций.

Ключевые слова: здания, микроклимат помещений, нестационарный теплообмен с внешней средой, грунтовые основания, тепловые потоки, численное моделирование, критерии подобия

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российской академии архитектуры и строительных наук.

Благодарности: авторы благодарят коллектив Научно-исследовательского института строительной физики за участие в постановке проблемы, на решение которой направлены проведенные исследования.

Для цитирования: Левин Е.В., Окунев А.Ю. Роль трансмиссионного теплообмена зданий с грунтовыми основаниями в формировании теплового микроклимата помещений в реальных внешних метеорологических условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 222–237. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-222-237. EDN: PQTKAL

ORIGINAL ARTICLE

TRANSMISSION HEAT EXCHANGE OF BUILDINGS ON SOIL FOUNDATIONS IN INDOOR MICROCLIMATE IN REAL EXTERNAL METEOROLOGICAL CONDITIONS

Evgeny V. Levin, Alexander Yu. Okunev

Research Institute of Building Physics RAACS, Moscow, Russia

Abstract. One of the tasks in the construction and operation of residential and public buildings is to meet the requirements for indoor microclimate. Current thermal microclimate depends on the building heat exchange with the external environment and on the climate control equipment. At the same time, the heat exchange with the external environment depends on constantly changing external conditions: air temperature, direct and diffuse solar radiation, radiant heat exchange with surrounding objects, and non-stationary heat transfer through ground foundations. All this must be taken into account by engineering climate systems in order to ensure rooms with the appropriate microclimate.

Purpose: The purpose of the work is to compare annual heat losses of a building through enclosing structures of rooms, both in and not in contact with ground foundations, determine the contribution of heat loss through soil foundations to overall heat losses through opaque enclosing structures.

Methodology: The studies include computational experiments to determine an unsteady indoor heat transfer quantities in the surrounding environment. The unsteady heat transfer boundary problem is expressed in parametric form and contains variable similarity criteria.

Research findings: Indoor studies are conducted at various parameters, using archival meteorological data for Moscow, 2011. The heat exchange with the soil foundation influence on the overall transient heat exchange is determined for different seasons and different orientations inside the building relative to cardinal directions. It is shown that indoor contact with the soil foundation leads to an increase in the average heat loss over seasons, regardless of the cardinal orientation and parameters of enclosing structures. The minimal increase in relative heat loss (no more than 18 %) occurs in winter. The maximum impact of the contact between rooms and soil foundation occurs in summer. Heat loss increases up to fourfold compared to rooms not in contact with the soil and, depending on the type of the enclosing structure, it can be two times higher on the southern façade than on the northern one. For rooms in contact with soil founda-

tions, the average seasonal amplitudes of daily changes in the heat loss are reduced for all types of enclosing structures.

Keywords: building, indoor microclimate, non-stationary heat exchange, external environment, soil foundation, heat flow, numerical modeling

Funding: Research was financially supported by grant from the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences.

Acknowledgments: The authors thank the staff of the Research Institute of Building Physics RAACS for their participation in formulating the research problem.

For citation: Levin E.V., Okunev A.Yu. Transmission Heat Exchange of Buildings on Soil Foundations in Indoor Microclimate in Real External Meteorological Conditions. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 222–237. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-222-237. EDN: PQTKAL

Введение

Показатели микроклимата помещений жилых и общественных зданий различного назначения, включая его тепловую составляющую (тепловой микроклимат), являются нормируемыми величинами¹. Сам тепловой микроклимат формируется за счет постоянно протекающего теплообмена с внешней средой и, в случае необходимости, поддерживается мощностями используемых инженерных систем нагрева и/или охлаждения воздуха.

Теплообмен помещений с внешней средой происходит через светопрозрачные и нестепрозрачные конструкции оболочки, а для первых и заглубленных этажей также через грунтовые основания. Через светопрозрачные конструкции имеют место прямые поступления в помещения солнечной энергии (инсоляция). Через светопрозрачные и нестепрозрачные конструкции также осуществляется трансмиссионный перенос теплоты. Данный вид теплопереноса происходит за счет теплопроводности и конвективного теплопереноса, одной из причин которого является отличие наружной температуры воздуха от температуры внутри помещений. Другими причинами будут изменения теплоступлений на поверхность ограждающей конструкции за счет прямого и рассеянного солнечного излучения, лучистого теплообмена с внешними объектами, включая поверхность грунта и небо. Каждый механизм теплообмена является принципиально нестационарным (переменным во времени) и имеет следующие глобальные масштабы: годовой периодически повторяющийся масштаб и масштабы суточных и сезонных изменений. При этом для грунтовых оснований в силу их большой инерционности основным является годовой масштаб времени, а для надземных ограждающих конструкций – преимущественно суточный. Изменения внутреннего теплового микроклимата помещений за счет внешних переменных тепловых воздействий на здания также будут происходить в пределах этих масштабов времени, а системы отопления и кондиционирования должны компенсировать эти изменяющиеся тепловые воздействия.

¹ ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Москва: Стандартинформ, 2011. 15 с.

К настоящему времени однозначного ответа на вопрос, каким образом в уже существующих и проектируемых зданиях должны функционировать на алгоритмическом уровне системы отопления и кондиционирования для поддержания стабильного теплового микроклимата в помещениях в условиях постоянно действующих внешних нестационарных тепловых воздействий, нет. На эту тему выполнено много работ, но все они ограничены только рядом отдельных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, которые в основном относятся к ограниченному спектру используемых на практике ограждающих конструкций зданий [1–8]. В исследованиях также практически не рассматривались различные внешние переменные метеорологические условия, соответствующие действительным.

С использованием современных расчетно-теоретических методов изучения нестационарного теплообмена такие широкомасштабные исследования, применимые к случаям использования в зданиях со значительно различными типами ограждающих конструкций, являются вполне реальными. Более того, существуют публикации [9], в которых поднимается вопрос о расширении возможностей физико-математического моделирования реального теплопереноса в строительстве. В работе указывается, что параметры микроклимата в помещениях зависят от множества факторов, как конструктивных, так и температурных параметров окружающей среды, причем большинство параметров являются нестационарными. Указывается, что для этого должны развиваться математические методы поиска численных решений уравнений, описывающих нестационарный перенос тепла, – методы конечных разностей или методы конечных элементов. На нескольких конкретных примерах авторы [9] показывают, как эти методы могут быть эффективно использованы в численных исследованиях.

В развитие данного направления авторами настоящей статьи ранее была предложена обобщенная физико-математическая модель трансмиссионного теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий, опубликованная в сборнике трудов [10]. Модель основана на решении одномерной краевой задачи нестационарного теплообмена помещения с окружающей средой, записанной в безразмерном виде с выделением ряда критериев (параметров) подобия, задаваемые величины которых могут соответствовать различным типам ограждающих конструкций зданий и различным типам тепловых воздействий и теплообмена на внутренней и внешней поверхностях ограждающих конструкций. Модель в безразмерном параметрическом виде также учитывает тепловые поступления от прямого и рассеянного солнечного излучения и лучистого теплообмена с внешней средой [11].

В работе [10] приведены результаты, полученные при изучении нестационарного теплообмена помещения здания через несветопрозрачные участки ограждающих конструкций. Исследования выполнены для полного годового периода эксплуатации здания в условиях, близких к реальным, для чего были использованы архивные метеорологические данные для средних широт территории РФ на примере Москвы. По результатам проведенных исследований сделан ряд выводов, касающихся теплопотерь через несветопрозрачные участки ограждающих конструкций различного типа в зависимости от календарного сезона и ориентации ограждающих конструкций здания по сторонам света. По-

лученные результаты могут быть отнесены к этажам здания, которые не контактируют с грунтовыми основаниями.

В то же время известно [12–15], что на первых, цокольных и других заглубленных в грунт этажах теплообмен через грунтовые основания может приводить к заметным дополнительным тепловым потерям и это должно учитываться при проектировании систем отопления и кондиционирования.

Настоящая статья является продолжением начатых в [10] работ. Целью исследований, результаты которых представлены в статье, являлось проведение сравнения теплотерь помещений для учета вклада величины теплотерь через грунтовые основания в общие теплотери помещений через несветопрозрачные ограждающие конструкции. Сравнение выполнено также в течение годового цикла эксплуатации здания при достаточно детальном моделировании внешних метеорологических условий. На основании полученных результатов могут быть сделаны выводы, насколько мощности систем отопления и кондиционирования первых и заглубленных в грунт этажей могут отличаться от соответствующих мощностей для всех других этажей.

Кроме полученных результатов исследований ниже приведены основные положения параметрической модели нестационарного теплопереноса в грунтах с выделением критериев подобия, величины которых позволяют обобщать полученные результаты на грунтовые основания различного типа. Соответствующая модель для теплопереноса в несветопрозрачных ограждающих конструкциях, как указывалось ранее, приведена в работе [10].

Параметрическая модель нестационарного теплопереноса в грунте

Нестационарный перенос теплоты в грунтовом основании описывается уравнением для пространственно-временного изменения температуры в его объеме:

$$F_g \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{t}} - \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где $\tilde{T} = T / T_{\text{ср}}$ – безразмерная абсолютная температура в грунте ($T_{\text{ср}}$ – среднегодовая абсолютная температура наружного воздуха для данной местности); $\tilde{t} = t / N_{\Gamma}$ – безразмерное время с начала года в виде номера суток, отнесенного к количеству суток в году, $N_{\Gamma} = 365$ сут; $\tilde{x} = x / B'$ и $\tilde{y} = y / B'$ – безразмерные горизонтальная и вертикальная координаты в грунте. При расчетах переноса теплоты в грунтах, в отличие от одномерной модели [10] для ограждающих конструкций, используется двухмерная модель, в которой вместо сложной конфигурации площади контакта основания здания с грунтом используется эффективная расчетная ширина здания [16] $B' = A / (0,5P)$, где A – площадь грунтового основания непосредственно под зданием; P – его периметр.

В уравнении теплопереноса (1) используется критерий подобия

$$F_g = (B' \rho_g c_g / N_{\Gamma}) / (\lambda_g / B'_g), \quad (2)$$

величина которого определяет инерционность различных грунтовых оснований по отношению к трансмиссионному переносу теплоты. Критерий характе-

ризует масштаб поглощения/отдачи тепловой энергии грунтовым основанием из тепловой энергии, переносимой в нем трансмиссионными тепловыми потоками при градиентах температуры, соответствующих 1 К. Обратная величина этого критерия аналогична критерию подобия Фурье F_0 для нестационарного теплопереноса, определяющего вклад времени в распределение температуры внутри грунтового основания. Здесь ρ_g , c_g и λ_g – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность грунта. Величина критерия подобия F_g для различных грунтов и эффективной ширины здания на практике может принимать значения от 0,5 до 100.

В качестве граничных условий на поверхности ограждающей конструкции, контактирующей с грунтом, и на поверхности грунта вне здания используется условие непрерывности плотности трансмиссионного теплового потока на соответствующей границе. На вертикальной плоскости симметрии здания и на вертикальных поверхностях, ограничивающих объем грунтового основания, используется условие отсутствия теплового потока. На нижней горизонтальной поверхности объема грунтового основания в зависимости от глубины ее залегания и глубины прохождения водоносного слоя может быть использовано условие изотермичности или условие отсутствия теплового потока. В том случае, когда грунтовое основание контактирует с подвижными грунтовыми водами малой или средней глубины залегания, граничное условие имеет вид

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = \frac{\bar{\tilde{T}}_w - \tilde{T}}{R_w}. \quad (3)$$

Здесь $\bar{\tilde{T}}_w$ – средняя безразмерная температура водоносного слоя;

$$R_w = r_w / (B' / \lambda_w) - \quad (4)$$

критерий подобия, характеризующий отношение среднего термического сопротивления водоносного слоя к масштабной величине термического сопротивления грунта вдоль водоносного слоя. По порядку величины он может принимать значения от 0,001 до 10.

В (4) λ_w – теплопроводность грунта в водоносном слое, а

$$r_w \approx \frac{2}{3\lambda_w} \sqrt{\frac{2c_w}{w}} L_0 - \quad (5)$$

среднее термическое сопротивление водоносного слоя [15], в котором c_w – удельная теплоемкость водоносного слоя; L_0 – длина пути, проходящего грунтовыми водами под зданием (эффективная ширина здания B' либо большая величина, учитывающая пространственные ориентации движения грунтовых вод); w – подвижность грунтовых вод, м/с.

Результаты исследования

Для установления роли теплопотерь через грунтовые основания в тепловом балансе помещений в исследованиях рассматривались два одинаковых базовых помещения с одинаковыми стеновыми несветопрозрачными огражда-

щими конструкциями, одно из которых контактирует с грунтом, а другое через перекрытия – с помещениями на смежных этажах, находящихся в тех же самых тепловых условиях. Для определенности будем считать, что первое помещение расположено на первом этаже и теплообмен с грунтовым основанием происходит через его пол, расположенный на плитном фундаменте по грунту. Далее это помещение будет иметь наименование ППЭ (помещение первого этажа), а помещение, не контактирующее с грунтовым основанием, будет иметь наименование ПВЭ (помещение верхнего этажа).

Для расчетов теплообмена через несветопрозрачные ограждающие конструкции обоих помещений используется физико-математическая модель теплопереноса в виде краевой задачи, приведенной в [10], а для расчетов нестационарного теплообмена с грунтовым основанием помещения ППЭ используется уравнение теплопереноса (1) с соответствующими приведенными выше граничными условиями. При исследованиях для обоих помещений расчету подлежали изменения во времени плотности тепловых потоков на внутренней поверхности стеновых несветопрозрачных ограждающих конструкций, а для помещения ППЭ рассчитывались также плотности тепловых потоков через его пол.

Для моделирования внешних нестационарных тепловых воздействий на оболочку зданий, как и в [10], применялись архивные годовые метеорологические данные для средних широт территории РФ на примере климатических условий для Москвы. Используемые метеорологические данные включали температуру наружного воздуха и облачность. Степень детализации использованных архивных данных и получаемых результатов за счет интерполяции составляла величину порядка 10 мин в масштабе реального времени.

Все расчетные исследования проведены при условии, когда в течение всего года внутри помещений системами отопления и кондиционирования поддерживается постоянная температура внутреннего воздуха $T_{\text{вн}} = 295 \text{ K } (+22 \text{ }^{\circ}\text{C})$. В этом случае полученные в результате расчетов величины переменных тепловых потоков в помещение соответствуют требуемой переменной мощности для поддержания заданной постоянной температуры, а расчеты трансмиссионного теплопереноса через стены и через грунтовое основания могут проводиться независимо.

Каждый вариант расчетов в проведенных параметрических исследованиях при варьировании параметров имел продолжительность в один календарный год в реальном времени и включал все климатические сезоны (зима, весна, лето, осень), что позволило учесть представленные в статье сезонные особенности влияния внешних тепловых воздействий на теплообмен здания с окружающей средой, а также потребности в мощностях отопления и/или кондиционирования. При этом если говорить об объемах проведенной вычислительной работы, то к нему кроме количества годовых циклов для величины каждого параметра добавляется еще 31 год в масштабе реального времени для расчета теплообмена в грунтовом основании, который требуется для достижения практически точного периодически повторяющегося процесса теплопереноса в грунте с заданной детализацией во времени. Как отмечено ранее, детализация расчетов во времени составляла не более 10 мин на фоне годового цикла расчетов.

Для проведения такого объема расчетов применялся конечно-разностный сеточный метод решения краевых задач нестационарного теплопереноса в огражда-

ющих конструкциях и в грунтовом основании, использующий явную двухшаговую по времени схему вычислений Дюфорта – Франкеля [17]. Метод является абсолютно устойчивым и явным, что позволяет эффективно проводить продолжительные в масштабах реального времени многопараметрические исследования.

При проведении исследований для получения обобщенных результатов выполнено параметрическое изучение теплообмена здания с внешней средой, где в качестве варьируемых параметров использованы величины критериев подобия, отвечающих за различные типы расположенных выше поверхности грунта стеновых несветопрозрачных ограждающих конструкций здания и за различные условия теплоступлений и теплообмена на их поверхности [10]:

$$F_{\text{инерц}} = (\delta \rho C_p / \tau_{\text{сут}}) / (\lambda / \delta) - \quad (6)$$

критерий инерционности ограждающей конструкции по отношению к трансмиссионному теплопереносу в ней. Он характеризует масштаб поглощения/отдачи тепловой энергии самой ограждающей конструкцией из тепловой энергии, переносимой в ней трансмиссионными тепловыми потоками при градиентах температуры, соответствующих 1 К. Обратная величина этого критерия, как и критерия (2), аналогична критерию подобия Фурье F_0 для нестационарного теплопереноса. Данный критерий подобия может принимать значения от 0,1 до 10;

$$F_{\text{Sin}} = (\delta / \lambda) / (1 / \alpha_v) - \quad (7)$$

критерий подобия, характеризующий отношение термического сопротивления ограждающей конструкции к сопротивлению конвективной теплоотдачи на ее внутренней поверхности. Этот критерий подобия аналогичен критерию Нуссельта Nu для конвективного теплообмена, но учитывает трансмиссионный теплоперенос внутри ограждающей конструкции и ее теплообмен с воздухом помещения. Данный критерий подобия может принимать характерные значения от 3 до 50;

$$F_{\text{Sout}} = (\sigma T_{\text{ср}}^4) / (T_{\text{ср}} (\lambda / \delta)) - \quad (8)$$

критерий подобия внешних теплоступлений на наружную поверхность ограждающих конструкций. Он характеризует масштаб отношения плотности теплового потока, поступающего на наружную поверхность ограждающей конструкции за счет ее облученности тепловым излучением, к плотности трансмиссионного теплового потока в ограждающей конструкции. Его характерные значения, по оценкам, составляют от 0,3 до 5,0.

В формулировке критериев подобия (6) – (8) использованы следующие обозначения: δ – толщина ограждающей конструкции; ρ – ее массовая плотность; C_p – удельная теплоемкость; λ – теплопроводность; $\tau_{\text{сут}}$ – продолжительность суток в используемом для всех остальных параметров масштабе времени; α_v – коэффициент конвективной теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции; σ – постоянная Стефана – Больцмана.

При проведении расчетов теплопереноса в стеновых несветопрозрачных ограждающих конструкциях использована модельная однослойная конструк-

ция, параметры которой соответствуют эквивалентной модели различных многослойных конструкций [18].

Для определенности в качестве помещений ППЭ и ПВЭ рассмотрено типовое помещение с площадью пола 24 м^2 и высотой потолков 3 м . Помещение имеет одну наружную стену $4 \times 3 \text{ м}$ (12 м^2). Наружная стена включает оконный проем площадью 5 м^2 , который в рамках данных исследований в теплообмене не учитывается. Для этого в расчетах полагается, что оконный проем не пропускает теплоту и солнечное излучение и не обладает тепловой инерцией. При этом расчетная площадь учитываемой несветопрозрачной части ограждающей конструкции составляет 7 м^2 .

При задании критерия подобия (2) F_g в уравнении (1) использованы типичные геометрические параметры здания (его эффективная расчетная ширина $B' = 6 \text{ м}$) и параметры грунта: $\rho_g = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $c_g = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\lambda_g = 1,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. При исследованиях учитывалось, что под зданием на глубине 10 м находится водоносный слой с низкой подвижностью грунтовых вод (критерий подобия $R_w \approx 1$).

Для того, чтобы установить общее влияние нестационарного теплообмена с грунтовым основанием на теплообмен помещений с внешней средой, сравниваются средние тепловые потоки $\langle U \rangle$ (Вт) из помещений (теплотери) через стены и пол за каждый из четырех календарных сезонов в виде отношения

$$\chi = \langle U \rangle_{\text{ППЭ}} / \langle U \rangle_{\text{ПВЭ}}. \quad (9)$$

Здесь и далее тепловой поток из помещения через ограждающие конструкции или пол имеет положительное значение. В отдельные моменты времени он может быть отрицательным, и это означает, что теплота поступает в помещение.

Как указывалось ранее, исследования проведены при условии постоянства внутренней температуры в помещении, в этом случае для первого этажа справедливо равенство $\langle U \rangle_{\text{ППЭ}} = \langle U \rangle_{\text{ПВЭ}} + \langle U \rangle_{\text{гр}}$, где $\langle U \rangle_{\text{гр}}$ – средний за сезон тепловой поток, поступающий в грунт из помещения. В проведенных расчетах для исключения ошибок за счет осреднения (тепловые потоки для любого момента времени могут быть как положительными, так и отрицательными по величине) расчеты $U_{\text{ППЭ}}$ для каждого момента времени проводились с учетом проходящего одновременно теплообмена через стеновые ограждающие конструкции и через пол. Получаемая величина (9) характеризует «среднесезонный» относительный вклад теплообмена с внешней средой через грунтовые основания в общий теплообмен помещений ППЭ.

Для проектирования «отопительных» систем значительный интерес представляют не только средние и максимальные мощности отопления и кондиционирования в каждом календарном сезоне, но также и то, в каких пределах эти мощности для каждого сезона могут изменяться в течение суток. В качестве критерия используется такая величина, как средняя за каждый сезон относительная суточная амплитуда изменений теплового баланса помещений

$$\delta = \langle (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) / 2\bar{U} \rangle. \quad (10)$$

Здесь $U_{\max}$, $U_{\min}$ и $\bar{U}$ – максимальная, минимальная и средняя за каждые сутки данного сезона величина теплового потока из помещения. Оператор $\langle x \rangle$ соответствует расчету средней величины x в течение сезона. Для помещений рассматриваемых типов сравнивается ее относительная величина

$$\gamma = \delta_{\text{ППЭ}} / \delta_{\text{ПВЭ}}, \quad (11)$$

показывающая, насколько теплообмен через грунт может повлиять на требования к возможным изменениям мощности систем отопления или кондиционирования в пределах суток за сезон.

Результаты проведенных исследований для величин (9) и (11), характеризующих вклад теплообмена помещений через грунтовые основания в их общий нестационарный теплообмен с внешней средой, приведены в таблице. В ней представлены данные, полученные для 80 годовых вариантов теплообмена, соответствующих различным величинам критериев подобия (6) – (8) и различным типам помещений (ППЭ и ПВЭ). Критерий подобия теплопереноса в грунтовом основании (2) при выбранных параметрах грунта составил $F_g = 1,52$, что соответствует грунтовому основанию, параметры которого приведены выше. Кроме того, в таблице в качестве варьируемого параметра отдельно приведена величина термического сопротивления ограждающей конструкции $R_T = \delta / \lambda$, которое используется для расчетов критериев подобия F_{Sin} и F_{Sout} и имеет величины, соответствующие реальным ограждающим конструкциям в интервале 1,0–5,0 К·м²/Вт.

В проведенных исследованиях также рассматривалась возможность того, что наружные ограждающие конструкции помещения могут быть ориентированы различным образом по сторонам света. В таблице приведены данные для северной (С) и южной (Ю) их ориентации.

**Средние за сезоны относительные тепловые потоки χ
и относительная суточная амплитуда теплопотерь γ**

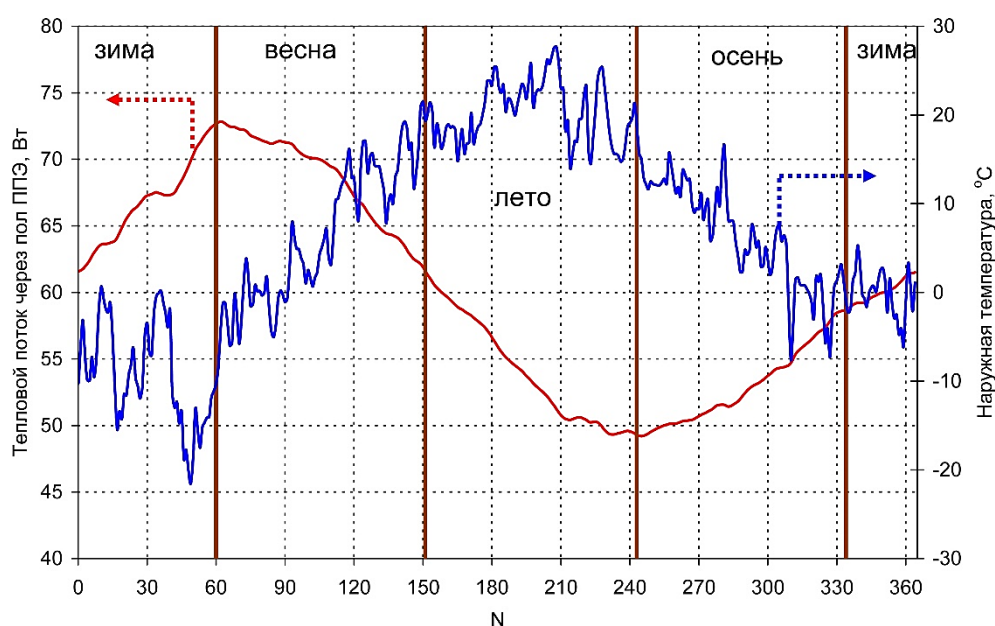
Seasonal average relative heat fluxes χ and relative daily heat loss amplitude γ

№	$F_{\text{инерц}}$	F_{Sin}	F_{Sout}	Ю, С	$R_T, \text{К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$	Отношение средних за сезон значений для этажей ППЭ и ПВЭ							
						Относительные тепловые потери χ				Относительные суточные амплитуды теплопотерь γ			
						зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
1	0,1	8,7	1,23	Ю	1	1,14	1,27	4,44	1,21	0,87	0,56	0,10	0,71
2	0,1			С		1,12	1,20	1,64	1,17	0,88	0,75	0,25	0,82
3	0,3			Ю		1,14	1,27	4,43	1,21	0,87	0,56	0,63	0,71
4	0,3			С		1,12	1,20	1,64	1,17	0,88	0,74	0,24	0,82
5	1			Ю		1,14	1,27	4,28	1,21	0,87	0,56	0,81	0,03
6	1			С		1,12	1,20	1,64	1,17	0,88	0,75	0,20	0,82
7	3			Ю		1,14	1,28	4,02	1,21	0,87	0,61	0,27	0,68
8	3			С		1,12	1,20	1,63	1,17	0,88	0,75	0,20	0,82
9	10			Ю		1,14	1,27	3,99	1,21	0,87	0,64	0,57	0,62
10	10			С		1,12	1,20	1,62	1,17	0,88	0,76	0,16	0,82

Окончание таблицы
End of table

№	$F_{инерц}$	F_{Sin}	F_{Sout}	Ю, С	$R_e, K \cdot m^2/BT$	Отношение средних за сезон значений для этажей ППЭ и ПВЭ							
						Относительные тепловые потери χ				Относительные суточные амплитуды теплопотерь γ			
						зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
11	0,1	17	2,46	Ю	2	1,16	1,30	4,04	1,24	0,86	0,55	0,36	0,70
12	0,1			С		1,15	1,25	1,88	1,20	0,86	0,69	0,16	0,79
13	0,3			Ю		1,16	1,30	4,04	1,24	0,86	0,55	0,35	0,70
14	0,3			С		1,15	1,25	1,88	1,20	0,86	0,69	<u>0,03</u>	0,79
15	1			Ю		1,16	1,30	4,00	1,24	0,85	0,55	<u>1,42</u>	0,71
16	1			С		1,15	1,25	1,87	1,20	0,86	0,69	0,21	0,79
17	3			Ю		1,16	1,31	3,90	1,24	0,85	0,57	0,42	0,71
18	3			С		1,15	1,25	1,85	1,20	0,86	0,69	0,20	0,79
19	10			Ю		1,16	1,31	3,80	1,24	0,85	0,60	1,07	0,68
20	10			С		1,14	1,25	1,82	1,20	0,86	0,71	0,25	0,79
21	0,1	26	3,69	Ю	3	1,17	1,32	3,90	1,25	0,85	0,54	0,25	0,70
22	0,1			С		1,16	1,27	2,01	1,22	0,85	0,67	0,31	0,78
23	0,3			Ю		1,17	1,32	3,90	1,25	0,85	0,54	<u>0,09</u>	0,70
24	0,3			С		1,16	1,27	2,01	1,22	0,85	0,66	0,20	0,77
25	1			Ю		1,17	1,32	3,88	1,25	0,85	0,54	0,29	0,70
26	1			С		1,16	1,27	1,99	1,22	0,85	0,66	0,25	0,77
27	3			Ю		1,17	1,32	3,84	1,25	0,84	0,55	<u>1,21</u>	0,70
28	3			С		1,16	1,27	1,97	1,22	0,85	0,67	0,25	0,77
29	10			Ю		1,17	1,32	3,74	1,25	0,84	0,58	0,60	0,69
30	10			С		1,16	1,27	1,93	1,22	0,85	0,68	0,25	0,77
31	0,1	44	6,15	Ю	5	1,18	1,33	3,79	1,26	0,84	0,52	1,06	0,70
32	0,1			С		1,17	1,30	2,16	1,24	0,84	0,64	0,13	0,77
33	0,3			Ю		1,18	1,33	3,79	1,26	0,84	0,52	1,00	0,70
34	0,3			С		1,17	1,30	2,15	1,24	0,84	0,64	<u>5,28</u>	0,76
35	1			Ю		1,18	1,33	3,78	1,26	0,84	0,52	<u>2,46</u>	0,70
36	1			С		1,17	1,30	2,13	1,23	0,84	0,64	0,41	0,76
37	3			Ю		1,18	1,33	3,76	1,26	0,83	0,53	0,35	0,70
38	3			С		1,17	1,29	2,10	1,23	0,84	0,64	0,23	0,76
39	10			Ю		1,18	1,33	3,70	1,26	0,83	0,55	0,29	0,69
40	10			С		1,17	1,29	2,05	1,23	0,84	0,65	0,31	0,76

Для лучшего понимания представленных в таблице данных на рисунке приведены полученные расчетами результаты для изменения в течение года теплового потока из помещения через пол ППЭ в грунтовое основание, а также изменения температуры наружного воздуха для использованных метеорологических условий.



Изменения наружной температуры и теплового потока через пол ППЭ в грунтовое основание в зависимости от номера суток в году N

Changes in outdoor temperature and heat flow through the floor into soil foundation depending on the day number N

Обсуждение полученных результатов

В результате проведенных исследований установлено, что в помещениях типа ПВЭ и ППЭ за счет внешних нестационарных тепловых воздействий на несветопрозрачные участки оболочки зданий в реальных метеорологических условиях г. Москвы в каждом календарном сезоне в среднем за сезон имеют место преимущественно только тепловые потери из помещений. Лишь в летнее время могут быть тепlopоступления в течение непродолжительного времени в течение отдельных суток.

Анализ результатов, представленных в таблице, позволяет сделать следующие основные выводы о влиянии на относительные тепловые потери теплообмена через грунтовые основания:

1) для ограждающих конструкций практически всех типов, различающихся как по их инерционности, так и по термическому сопротивлению, присутствие грунтовых оснований приводит к увеличению средних за сезоны тепловых потерь для помещений ППЭ (первые и заглубленные этажи, контактирующие с грунтом) по отношению к другим этажам здания, причем независимо от ориентации здания по сторонам света;

2) минимальное увеличение относительных тепловых потерь (не более 18 %) имеет место в зимний годовой период. При этом ориентация фасада здания по сторонам света практически не сказывается на величине тепловых потерь;

3) в периоды межсезонья (весна, осень) относительные тепловые потери примерно в два раза выше, чем в зимнее время, и их величины начинают за-

метно зависеть от ориентации здания. На южной стороне увеличение относительных тепловых потерь больше, чем на северной;

4) максимальное влияние присутствия грунтового основания имеет место в летний период. Тепловые потери для помещений ППЭ первых и заглубленных этажей могут оказаться до 4 раз больше, чем для помещений, расположенных на более высоких этажах;

5) в летний период на относительные тепловые потери проявляется сильное влияние ориентации фасада здания по сторонам света. Для фасадов с южной ориентацией относительные тепловые потери в зависимости от тепловой инерции и термического сопротивления ограждающей конструкции могут оказаться до 2 раз больше, чем для северного фасада.

Что касается средних за сезоны относительных суточных амплитуд изменения тепловых потерь из помещений, то для них влияние теплообмена через грунтовые основания проявляется следующим образом:

а) присутствие грунтовых оснований для помещений ППЭ по сравнению с помещениями ПВЭ приводит к снижению суточных амплитуд для всех типов ограждающих конструкций;

б) минимальное снижение имеет место в зимний сезон, а максимальное – в летний, причем в летний сезон имеет место достаточно заметная зависимость от тепловой инерции ограждающей конструкции. Эта зависимость почти не проявляется в зимний сезон и характерна гораздо в меньшей степени для весеннего и осеннего сезонов;

в) в летний сезон также имеет место то, что средние за сезон суточные амплитуды сильно зависят от ориентации фасада по сторонам света, причем эта зависимость достаточно чувствительна по отношению к инерционности ограждающей конструкции. По-видимому, эта зависимость связана с тем, что в летнее время проявляется сильное влияние теплопоступлений от солнечного излучения, а теплопоступления от грунтового основания минимальны (см. рисунок);

г) в летний и осенний сезоны по отдельным результатам расчетов величина γ принимает аномальные значения, которые выделяются из общих закономерностей (см. таблицу, числа, выделенные подчеркиванием). Это связано с тем, что при данном сочетании величин безразмерных критериев подобия (инерционности ограждающих конструкций и тепловых воздействий) в этих сезонах могут присутствовать такие сутки, в течение которых среднесуточная величина теплопотерь близка к нулю (на два-три порядка меньше чем в остальные сутки), что может реализовываться как для ППЭ, так и для ПВЭ и в основном связано с нестационарностью реальных внешних тепловых воздействий.

Заключение

В рамках настоящей статьи приведены математическая модель и результаты численных исследований нестационарного теплообмена помещений в течение года с окружающей средой для двух типов помещений: контактирующих и не контактирующих с грунтовыми основаниями. Исследования проведены с целью сравнения теплопотерь помещений для учета вклада величины теплопотерь через грунтовое основание в общие теплопотери помещения через не-светопрозрачные ограждающие конструкции. Исследования выполнены для

реальных метеорологических условий, определяющих нестационарный годовой теплообмен зданий с внешней средой для средних широт территории РФ на примере г. Москвы и учитывают изменения температуры наружного воздуха, конвективный и лучистый теплообмен, а также прямое и рассеянное солнечное излучение при действительных условиях облачности.

Исследования выполнены на основе физико-математического моделирования нестационарного теплопереноса в ограждающих конструкциях и грунтовых основаниях и постановки цикла вычислительных экспериментов.

По результатам исследований установлены влияние внешних естественных тепловых воздействий на здания на тепловые потери помещений через несветопрозрачные ограждающие конструкции и вклад в эти тепловые потери нестационарного теплопереноса через грунтовые основания. Показано влияние на величины тепловых потерь ориентации наружной стены помещения по сторонам света и календарного годового сезона. В частности, установлено, что контакт помещения с грунтовым основанием приводит к увеличению средних за календарные сезоны теплопотерь, причем независимо от ориентации по сторонам света и параметров ограждающих конструкций. Одновременно с этим средние за сезоны амплитуды суточных изменений теплопотерь снижаются для всех типов ограждающих конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Valancius K., Skrinska A.K., Paulauskaitė S. Investigation of unsteady heat transfer process in an one-cell building // Journal of Civil Engineering and Management. 2006. V. 12. № 1. P. 97–101.
2. Хуторной А.Н., Кузин А.Я., Цветков Н.А., Мирошниченко Н.Т., Колесникова А.В. Нестационарный пространственный теплоперенос в неоднородной керамзитобетонной стене // Известия ТПУ. 2006. Т. 309. № 4. С. 113–117.
3. Панферов В.И., Анисимова Е.Ю., Нагорная А.Н. К теории математического моделирования теплового режима зданий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2006. № 14. С. 128–133.
4. Захаревич А.Э. Особенности формирования микроклимата отапливаемых помещений // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. С. 73–85.
5. Дячек П.И., Захаревич А.Э. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. С. 34–47.
6. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов в ограждающих конструкциях зданий // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 8 (часть 2). С. 265–269.
7. Overen O.K., Meyer E.L., Golden M. Perimeter Walls Solar Heat Gain, a Mechanism for Building Design // Proceedings: 11th Built Environment Conference, 6–8 August. Durban, South Africa, 2017. ISBN 978-0-620-76406-3.
8. Мерциев А.А., Головинский П.А., Свириг М.В., Семиненко А.С. Моделирование нестационарного теплового режима помещения с деревянными ограждающими конструкциями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49
9. Дячек П.И., Макаревич С.А., Захаревич А.Э., Ливанский Д.Г. Математические методы в отоплении, вентиляции и кондиционировании воздуха // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 143–147.
10. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Нестационарный теплообмен помещений с внешней средой через несветопрозрачные ограждающие конструкции // Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение, надежность строительных конструкций и экологическая безопасность. Искусственный интеллект : Международная научная конференция XV Акаде-

- мические чтения, посвященные памяти академика РААСН Г.Л. Осипова, Москва, 1–3 июля 2025 г. Москва, 2025. С. 333–344.
11. Окунев А.Ю., Левин Е.В. Лучистый теплообмен ограждающих конструкций зданий с окружающей средой // Жилищное строительство. 2023. № 6. С. 43–51. DOI: 10.31659/044-4472-2024-7-38-45
 12. Spiga M., Vocale P. Effect of Floor Geometry on Building Heat Loss Via the Ground // Heat Transfer Engineering. 2014. V. 35. P. 1520–1527. DOI: 10.1080/01457632.2014.897560
 13. Окунев А.Ю., Левин Е.В. Численные исследования нестационарного теплопереноса в основаниях зданий. Отапливаемый заглубленный этаж // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 6. С. 55–57.
 14. Levin E.V., Okunev A.Yu. Nonsteady Heat Loses to the Ground from a Building with Heated Underground Floor or Slab on Ground // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. 2021. V. 1079 (4). Article 042074. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042074
 15. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Численные исследования нестационарного теплопереноса в основаниях зданий. Влияние грунтовых вод // Технологии текстильной промышленности. 2019. № 4 (382). С. 216–223.
 16. Anderson B.R. Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on ground floor // Building and Environment. 1991. V. 26. P. 405–415.
 17. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / пер. с англ. В.А. Гущина, В.Я. Митницкого. Москва : Мир, 1980. 616 с.
 18. Окунев А.Ю., Левин Е.В. Эквивалентная модель многослойных ограждающих конструкций для расчетов нестационарного теплопереноса // Строительные материалы. 2025. № 6. С. 14–19. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-836-6-14-19

REFERENCES

1. Valancius K., Skrinska A.K., Paulauskaitė S. Investigation of Unsteady Heat Transfer Process in an One-Cell Building. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2006; 12 (1): 97–101.
2. Khutornoj A.N., Kuzin A.Ya., Tsvetkov N.A., Miroshnichenko N.T., Kolesnikova A.V. Nonstationary Spatial Heat Transfer in a Nonuniform Expanded Clay Wall. *Izvestiya TPU*. 2006; 17 (4): 113–117. (in Russian)
3. Panferov V.I., Anisimova E.Yu., Nagornaya A.N. Towards the Theory of Mathematical Modeling of Building Thermal Conditions. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2006; (14): 128–133. (in Russian)
4. Zaharevich A.E. Microclimate Formation in Heated Rooms. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG*. 2009: 73–85. (in Russian)
5. Dyachek P.I., Zaharevich A.E. Microclimate Simulation in Heated Rooms. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG*. 2009: 34–47. (in Russian)
6. Tarasova V.V. Mathematical Modeling of Unsteady Thermal Processes in Building Enclosing Structures. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016; (8 (part 2)): 265–269. (in Russian)
7. Overen O.K., Meyer E.L., Golden M. Perimeter Walls Solar Heat Gain, a Mechanism for Building Design. In: *Proc. 11th Built Environment Conf.* 6–8 August 2017. Durban, South Africa. ISBN 978-0-620-76406-3.
8. Mershchiev A.A., Golovinski P.A., Svirin M.V., Seminenko A.S. Simulation of a Non-Stationary Thermal Mode of Premise with Wood Enclosing Structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 8: 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49 (in Russian)
9. Dyachek P.I., Makarevich S.A., Zaharevich A.E., Livanskij D.G. Mathematical Methods in Heating, Ventilation and Air Conditioning. *Vestnik MGSU*. 2011; (7): 143–147. (In Russian)
10. Levin E.V., Okunev A.Yu. Non-Stationary Heat Exchange of Rooms with External Environment Through Non-Translucent Enclosing Structures. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Relevant Problems of construction. Reliability of building structures. Energy Efficiency. Environmental safety. Artificial intelligence'*, 1–3 July 2025. Moscow. ISBN 978-5-902630-23-4. (in Russian)
11. Okunev A.Yu., Levin E.V. Radiant Heat Exchange of Building Enclosing Structures with the Environment. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2023, (6): 43–51. DOI: 10.31659/044-4472-2024-7-38-45 (In Russian)
12. Marco Spiga, Pamela Vocale. Effect of Floor Geometry on Building Heat Loss Via the Ground. *Heat Transfer Engineering*. 2014; 35. (18): 1520–1527. DOI: 10.1080/01457632.2014.897560

13. Okunev A.Yu., Levin E.V. Numerical Studies of Unsteady Heat Transfer in Building Foundations. Heated recessed floor. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*. 2019; (6): 55–57. (In Russian)
14. Levin E., Okunev A. Nonsteady Heat Loses to the Ground from a Building with Heated Underground Floor or Slab on Ground. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1079 (4). Article 042074. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042074
15. Levin E.V., Okunev A.Yu. Numerical Studies of Unsteady Heat Transfer in Building Foundations. Groundwater Effect. *Tekhnologii tekstil'noj promyshlennosti*. 2019; 4 (382): 216–223. (In Russian)
16. Anderson B.R. Calculation of Steady-State Heat Transfer Through a Slab-On Ground Floor. *Building and Environment*. 1991; 26: 405–415.
17. Rouch P. Computational Fluid Dynamics. Moscow: Mir, 1980. 616 p. (Russian translation).
18. Okunev A.Yu., Levin E.V. An Equivalent Model of Multilayer Enclosing Structures for Calculations of Unsteady Heat Transfer. *Stroitel'nye materialy*. 2025; (6): 14–19. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-836-6-14-19 (In Russian)

Сведения об авторах

Левин Евгений Владимирович, канд. физ.-мат. наук, гл. научный сотрудник, Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, evlev@list.ru

Окунев Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, okunevay@gmail.com

Authors Details

Evgeny V. Levin, PhD, Chief Researcher, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, evlev@list.ru

Alexander Yu. Okunev, PhD, Chief Researcher, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, okunevay@gmail.com

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 08.10.2025
Одобрена после рецензирования 01.11.2025
Принята к публикации 02.02.2026

Submitted for publication 08.10.2025
Approved after review 01.11.2025
Accepted for publication 02.02.2026

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 238–248.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 238–248.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 628.2:004.9

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-238-248

EDN: RTCZIP

КОМПЛЕКСОТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И КАНАЛИЗАЦИИ

Андрей Игоревич Мохов¹, Дмитрий Иванович Шлычков²,
Андрей Геннадьевич Челоненко³, Софья Владимировна Кондрашова²

¹Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

²Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

³Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Значительный износ трубопроводных сетей водоснабжения и канализации, ограниченность традиционных методов их эксплуатации требуют применения интегрированных подходов к управлению инженерной инфраструктурой. В этих условиях актуальной является разработка системотехнического и комплексотехнического подходов, основанных на объективной оценке эксплуатационного состояния и эффективности функционирования сетей.

Цель. Обосновать необходимость применения системотехнического и комплексотехнического подходов к обеспечению устойчивого функционирования трубопроводных се-

тей водоснабжения и канализации, а также совершенствование критериев оценки эффективности их эксплуатации на основе расчета гидравлических показателей.

Методы. В работе использованы методы системного анализа, классификации видов переустройства трубопроводных сетей по уровню потерь эксплуатационного ресурса, а также количественная гидравлическая оценка состояния труб с применением коэффициента гидравлической эффективности эксплуатации.

Результаты. Проанализированы традиционные технологии переустройства сетей и критерии оценки их эксплуатационного качества, включая коэффициент гидравлической эффективности. Предложены системотехнический и комплексотехнический подходы, основанные на принципах комплексной оценки технических, организационных, управленческих и экономических аспектов функционирования и развития сетей.

Выводы. Обоснована и доказана эффективность применения системотехнического и комплексотехнического подходов при управлении процессами переустройства и эксплуатации инженерных сетей. Аргументирована необходимость внедрения интеллектуальных технологий мониторинга и переустройства трубопроводов, а также отмечена целесообразность подготовки к проведению такого мониторинга специалистов эксплуатирующей организации.

Ключевые слова: интеллектуальные технологии, канализационные и водопроводные сети, комплексотехнический подход, коэффициент гидравлической эффективности, переустройство трубопроводов, системотехнический подход, срок службы, эксплуатационное качество

Для цитирования: Мохов А.И., Шлычков Д.И., Челоненко А.Г., Кондрашова С.В. Комплексотехнический подход к обеспечению устойчивого развития инфраструктуры жилищно-коммунальных систем на примере эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения и канализации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 238–248. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-238-248. EDN: RTCZIP

ORIGINAL ARTICLE

INTEGRATED ENGINEERING APPROACH TO STABLE DEVELOPMENT OF WATER SUPPLY AND SEWERAGE SYSTEMS

Andrei I. Mokhov¹, Dmitrii I. Shlychkov²,
Andrei G. Chelonenko³, Sof'ya V. Kondrashova²

¹Dubna State University, Dubna, Russia

²The National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. Purpose: To substantiate the need to apply systems and complex engineering approaches to ensure a stable development of water supply and sewerage systems, as well as the to improve criteria for evaluating the effectiveness of their operation based on the calculation of hydraulic indicators.

Methodology: Complex analysis, classification of pipeline networks, reconstruction according to the level of operational resource losses, quantitative hydraulic assessment of pipes using the coefficient of hydraulic operational efficiency.

Research findings: Traditional methods of the network reconstruction and criteria for assessing their operational quality, including the coefficient of hydraulic efficiency, are analyzed. Systems and complex engineering approaches are based on the comprehensive assessment of the technical, organizational, managerial and economic aspects of the functioning and development of networks.

Value: The effectiveness of applying systems and complex engineering approaches to the reconstruction and operation of engineering networks is substantiated and proved. The necessity of introducing intelligent technologies for monitoring and rebuilding pipelines is substantiated, as well as the need for training specialists in this field.

Keywords: intelligent technology, sewage and water supply network, integrated technical approach, hydraulic efficiency coefficient, pipeline reconstruction, system engineering approach, service life, operational quality

For citation: Mokhov A.I., Shlychkov D.I., Chelonenko A.G., Kondrashova S.V. Integrated Engineering Approach to Stable Development of Water Supply and Sewerage Systems. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 238–248. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-238-248. EDN: RTCZIP

Введение

Системотехника – это область науки и техники, которая изучает принципы, методы и средства проектирования, создания, функционирования и управления сложными системами различного назначения на протяжении всего их жизненного цикла.

Термин «системотехника» возник в 50-е гг. XX в. в связи с развитием теоретических и практических основ системного подхода к решению инженерных задач. Одним из основателей системотехники считается американский ученый и инженер Джейкоб Ремсдейл, который активно работал в области теории систем [1].

Системотехника как дисциплина стала развиваться в Советском Союзе в 1960-е гг., когда важность комплексного подхода в решении проблем управления сложными технологическими процессами стала очевидной.

Методологической основой системотехники строительства послужила общая теория функциональных систем, разработанная советским академиком Петром Кузьмичом Анохиным. Данная теория нашла широкое применение в различных областях науки и техники и оказала значительное влияние на формирование системного подхода как универсального инструмента исследования и проектирования сложных объектов. В строительстве данный подход приобретает особую значимость, поскольку строительные объекты и технологические процессы характеризуются многоуровневой структурой, сложной внутренней организацией и наличием многочисленных обратных связей. Эффективное проектирование таких систем требует учета не только параметров отдельных подсистем, но и характера их взаимодействия, влияния внешней среды и способности системы адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования [2].

Благодаря интеграции принципов Анохина в инженерную практику стало возможным создавать модели, позволяющие прогнозировать поведение строительных систем, выявлять потенциальные риски, оценивать эффективность управленческих решений и оптимизировать технологические процессы. Такой подход усиливает научную обоснованность проектирования и способствует развитию более устойчивых, адаптивных и надежных инженерных решений [3].

Системотехника строительства – научно-техническая дисциплина, изучающая совокупность технических, организационных, управленческих, экономических и иных строительных систем, а также межсистемные связи, направленные на достижение конечного результата в строительной деятельности и обеспечение устойчивого функционирования строительных комплексов.

Устойчивое функционирование – это свойство системы сохранять работоспособность и обеспечивать выполнение заданных функций.

Практика градостроительного развития показывает, что устойчивый и сбалансированный рост жилищного строительства возможен лишь при условии опережающего развития инженерной инфраструктуры [4].

Особенностью инженерной инфраструктуры является сервисный характер ее функционирования. В отличие от зданий и сооружений, которые обладают самостоятельной ценностью и предназначены для непосредственного пользования, инженерные сети имеют прикладное назначение: они создаются для обеспечения ресурсами и услугами конечных потребителей – жилых домов, производственных объектов, объектов социальной сферы. Инфраструктура не существует сама по себе; ее смысл определяется способностью поддерживать бесперебойное функционирование городской среды и формировать условия для устойчивого градостроительного развития. Поэтому ее развитие не является самоцелью, а выполняет обслуживающую, прикладную роль – создание условий для нормальной эксплуатации уже имеющихся объектов и для застройки новых территорий [5].

Протяженность трубопроводных сетей в Российской Федерации значительна, что обусловлено масштабами территории страны. Более чем в 20 тыс. муниципальных образований здания и сооружения характеризуются высоким уровнем инженерного благоустройства [6], при этом:

- 84 % оборудованы централизованной системой водоснабжения;
- 82 % оборудованы централизованной системой канализации.

Несмотря на это, функционирование инженерных сетей во многих случаях сопровождается низким качеством коммунальных услуг, нерациональным использованием природных ресурсов и негативным воздействием на окружающую среду.

К основным причинам сложившейся ситуации относятся высокий уровень физического износа основных фондов, моральное и технологическое устаревание объектов инженерной инфраструктуры, недостаточная эффективность существующей системы управления коммунальным хозяйством, а также недооценка роли комплексного городского планирования.

По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат), общий износ водопроводных сетей составляет 43 % (251 тыс. км из 584 тыс. км), сетей канализации – превышает 46 % (93 тыс. км из 203 тыс. км).

Методы

Водопроводные и канализационные трубопроводы являются системными объектами, в отношении которых на постоянной основе необходимо принимать организационно-технологические решения, направленные на компенсацию недостатков, выявленных на каком-либо этапе жизненного цикла.

В отношении сетей водопровода и канализации принято использовать традиционные технологии переустройства: ремонт, реновацию и реконструкцию, направленные на восстановление и сохранение эксплуатационного качества (табл. 1).

Таблица 1

Технология переустройства канализационных сетей

Table 1

Reconstruction of water supply and sewerage systems

Объект переустройства	Виды переустройства		
	Ремонт	Реновация	Реконструкция
Водопроводные сети	+	+	+
Канализационные сети	+	+	+

Ресурс, заложенный в объект на стадиях проектирования и строительства, постепенно исчерпывается в процессе эксплуатации.

В зависимости от степени утраты функционального ресурса возможно классифицировать виды переустройства инженерных сетей (рис. 1).

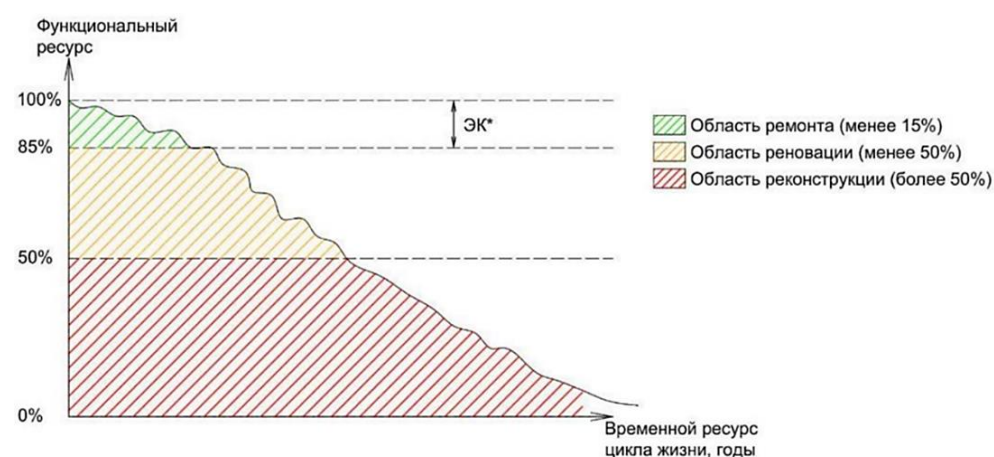


Рис. 1. Виды переустройства на основе потерь функционального ресурса (ЭК* – заданный уровень эксплуатационного качества)

Fig. 1. Types of reorganization based on the functional resource loss (EK* – specified level of operational quality)

Больше 50 % потерь ЭК попадает в область реконструкции, меньше 50 % – в область реновации, меньше 15 % – в область ремонта.

Переустройство объекта можно выполнять на этапе жизненного цикла.

Заданный уровень ЭК находится в диапазоне от 85 до 100 %.

Допускается выполнять ремонтные работы без нарушения функционирования объекта.

Оценку эксплуатационного качества можно проводить по критериям гидравлической эффективности эксплуатации.

Критерий оценки эксплуатационного состояния водопроводных и канализационных сетей (коэффициент эффективности эксплуатации $K_{эф}$) получен на основании допустимых параметров гидравлического потенциала труб (скорость V , потери напоры на водопроводных сетях i , гидравлический уклон i канализационных сетей). Данный коэффициент получен на основании аналитических расчетов и методологического подхода. Подобный подход дает возможность предсказывать динамику изменения параметров гидравлического потенциала труб на протяжении всего срока их эксплуатации. В результате это позволяет заранее, до проведения гидродинамической очистки или полной замены трубопроводов, определить необходимость таких мероприятий. В будущем планируется разработка специальных таблиц для гидравлического расчета в зависимости от коэффициента эффективности эксплуатации. Количественная оценка продолжительности периода остаточной эффективной эксплуатации изношенных трубопроводов систем водоснабжения и канализации – это **новое научное направление** в науке о трубопроводах. Разработана и внедрена на практике методика, обеспечивающая возможность определение временного периода остаточной продолжительности эксплуатации изношенных сетей водоснабжения и канализации с внутренними отложениями по величине значения универсального критерия – **коэффициента гидравлической эффективности эксплуатации изношенной сети**, объективно учитывающего фактическое состояние ее рабочей поверхности труб с отложениями на внутренних стенках, определяемый по формуле

$$K_{эф} = \frac{(d_{вн}^p)^2 V_p \cdot i_p}{(d_{вн}^ф)^2 V_ф \cdot i_ф}, \quad (1)$$

где $K_{эф}$ – безразмерный коэффициент гидравлической эффективности эксплуатации трубопровода (труб); $d_{вн}^p$, V_p и i_p – расчетные параметры новых труб в соответствии с государственными стандартами (рис. 2); $d_{вн}^ф$, $V_ф$ и $i_ф$ – фактические параметры трубопровода с учетом внутренних отложений (рис. 3).

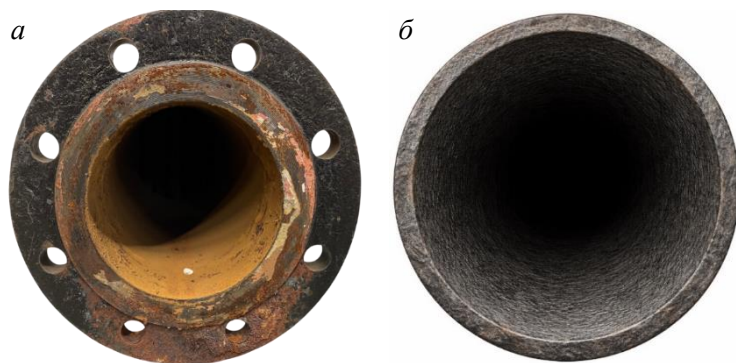


Рис. 2. Новые трубопроводы:
а – водоснабжения; б – канализации
Fig. 2. New pipelines:
а – water supply; б – sewerage

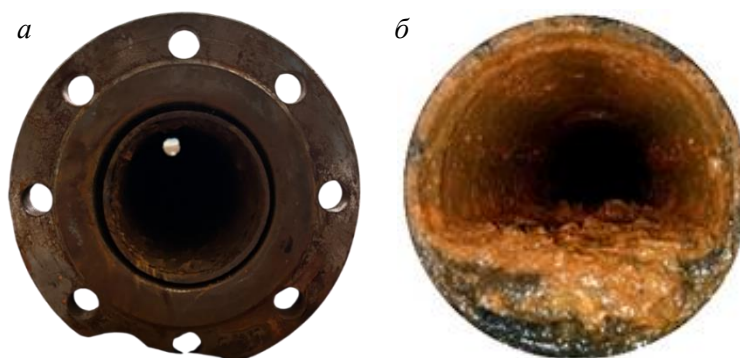


Рис. 3. Эксплуатируемые трубопроводы:
 а – водоснабжения; б – канализации
 Fig. 3. Pipelines in operation:
 а – water supply; б – sewerage

Количественная оценка продолжительности периода остаточной эффективной эксплуатации изношенных трубопроводов систем водоснабжения и канализации – это новое научное направление в науке о трубопроводах. Разработанная и внедренная на практике методика, обеспечивающая возможность определения временного периода остаточной продолжительности эксплуатации изношенных сетей водоснабжения и канализации с внутренними отложениями по величине значения универсального критерия – коэффициента гидравлической эффективности эксплуатации изношенной сети, объективно учитывающего фактическое состояние рабочей поверхности труб с отложениями на внутренних стенках.

Результаты

Диапазон изменения $K_{эф}$ водопроводных сетей представлен в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон изменения $K_{эф}$ для сетей водоснабжения

Table 2

Range of hydraulic efficiency coefficient for water supply systems

Значение величины $K_{эф}$	Продолжительность периода остаточной эксплуатации трубопровода из стали и серого чугуна $T_{исп}$, лет
$0,95 \leq K_{эф} \leq 1$	$T_{исп} \geq 5$ лет с ежегодным контролем значений фактических потерь напора $i_{ф}$ и толщины фактического слоя отложений $\delta_{ф}$
$0,90 \leq K_{эф} \leq 0,95$	$T_{исп} \geq$ не менее 1 года с ежегодным контролем значений $i_{ф}$ и $\delta_{ф}$
$0,80 \leq K_{эф} \leq 0,90$	Трубопровод эксплуатировать нецелесообразно
$K_{эф} < 0,80$	Трубопровод эксплуатировать недопустимо

Для канализационных сетей расчетные значения коэффициента изменяются в диапазоне от 0 (при значительных отложениях в лотковой части трубы) до 1 (для новых труб), что отражено в табл. 3.

Таблица 3

Диапазон изменения $K_{\text{эф}}$ для сетей канализации

Table 3

Range of hydraulic efficiency coefficient for sewerage systems

Значение величины $K_{\text{эф}}$	Возможность продолжения дальнейшей эксплуатации сети
$0,6 \leq K_{\text{эф}} \leq 1$	Возможно
$0,5 \leq K_{\text{эф}} \leq 0,6$	Требуется проведение гидродинамической очистки сети
$K_{\text{эф}} \leq 0,5$	Сеть эксплуатировать недопустимо

Необходимость создания интеллектуальных технологий переустройства водопроводных и канализационных сетей обусловлена комплексной задачей обеспечения гидравлической эффективности, устойчивого функционирования, экономии ресурсов, минимизации аварийных ситуаций и интеграции с современными цифровыми системами управления городской инфраструктурой [8, 9].

В настоящее время $K_{\text{эф}}$ не является интеллектуальной технологией переустройства, потому что достижение конечного положительного результата возможно путем объединения целей, интегрированных в деятельность, связанную с эксплуатацией сетей. Процесс эксплуатации необходимо рассматривать с позиции технического, организационного, управленческого и экономического аспектов [10].

Заключение

Все вышеизложенное позволяет сформулировать принципы создания интеллектуальной технологии переустройства водопроводных и канализационных сетей.

Технология переустройства должна опираться на данные интеллектуального мониторинга, обеспечивающего глубокий анализ состояния объекта и его элементов, а также на требуемый уровень подготовки субъектов, реализующих переустройство и проводящих эксплуатацию объекта. Применение интеллектуальных методов предполагает восстановление и улучшение функционала сразу нескольких элементов комплексного объекта переустройства.

Такая технология должна иметь многоцелевую направленность и ориентироваться на три приоритетных результата: ресурсосбережение (цель № 1), повышение безопасности функционирования объекта на этапе его эксплуатации (цель № 2) и повышение комфортности эксплуатации объекта (цель № 3).

Для достижения поставленных целей и определения дальнейших направлений исследования авторы предлагают использовать комплексотехнический подход [11]. Он охватывает как технические, так и организационные аспекты эксплуатации водопроводных и канализационных трубопроводов.

В отличие от системотехники, ориентированной на объединение систем с одинаковыми целями функционирования, комплексотехника в процессе проектирования, создания и развития соединяет системы с противоположными целями при объединении их жизненных циклов.

Комплексотехнический подход предполагает участие в эксплуатации трубопроводов специалистов, учитывающих изменение эффективности эксплуатации во времени с учетом конкретных условий для различных труб (из стали и чугуна), в том числе как для внутренних, так и для наружных сетей, и принимающих решения о применении конкретной технологии переустройства сети.

Примером подтверждения актуальности применения такого подхода можно считать подготовку проекта стандарта ГОСТ Р «Зеленый капитальный ремонт зданий и сооружений»¹, проходящего в настоящее время этап общественных обсуждений.

Применение системотехнического и комплексотехнического подходов в целях обеспечения устойчивого функционирования водопроводных и канализационных трубопроводов и развития технологий эксплуатации этих объектов призвано превратить их в единый интеллектуальный и управляемый организм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Семечкин А.Е. Системный анализ и системотехника. Москва : SvS-Аргус, 2005. 536 с.
2. Анохин П.К. Избранные труды. Философские аспекты теории функциональной системы. Москва : Наука. 1978.
3. Лапкин М.М., Кирюшин В.А., Козеевская Н.А. П.К. Анохин – создатель теории функциональной системы (к 120-летию со дня рождения академика Петра Кузьмича Анохина) // Российский медико-биологический вестник им. акад. И.П. Павлова. 2018. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/p-k-anohin-sozdatel-teorii-funktsionalnoy-sistemy-k-120-letiyu-so-dnya-rozhdeniya-akademika-petra-kuzmicha-anohina> (дата обращения: 10.12.2025).
4. Король Е.А., Дудина А.Г., Петросян Р.С. Систематизация понятийного аппарата технологичности строительных систем в научно-методической литературе // Жилищное строительство. 2024. № 7. С. 32–37.
5. Король Е.А., Дудина А.Г., Петросян Р.С. Вариативные подходы к оценке технологичности при производстве работ по устройству строительных систем // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. № 3. С. 119–130.
6. Король Е.А., Римшин В.И. Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. Эксплуатация инженерных сетей, систем и оборудования. Москва : Изд-во АСВ, 2023. 406 с.
7. Продоус О.А., Шлычков Д.И., Челоненко А.Г. Классификация состояния канализационных сетей по толщине слоя осадка в лотковой части труб // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 1. С. 96–104. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-1-96-104
8. Теличенко В.И., Король Е.А., Каган П.Б., Куликова Е.Н. Системотехника управления целевыми строительными программами. Москва : Изд-во АСВ, 2010. 224 с.
9. Гусаков А.А., Богомолов Ю.М., Брехман А.И., Ваганян Г.А. Системотехника строительства : энциклопедический словарь. Москва : Изд-во АСВ, 2004. 319 с.
10. Информационные модели функциональных систем. Москва : Фонд «Новое тысячелетие», 2004. С. 7–114.
11. Мохов А.И. Отличие в подходе системотехники и комплексотехники к созданию технических систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. Т. 7. № 1. С. 3–7.

REFERENCES

1. Semechkin A.E. System Analysis and System Engineering. Moscow: SvS–Argus, 2005. 536 p. (In Russian)

¹ Проект ГОСТ Р «Зеленый капитальный ремонт зданий и сооружений» разработан на основании Программы национальной стандартизации, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) № 2459 от 01 ноября 2021 г. Шифр темы 1.0.366-1.051.24 (рукопись).

2. Anokhin P.K. Selected Papers. Philosophical Aspects of the Functional System Theory. Moscow: Nauka, 1978. (In Russian)
3. Lapkin M.M., Kiryushin V.A., Kozevskaya N.A. P.K. Anokhin, a Creator of the Theory of a Functional System (dedicated to the 120th anniversary of the birth of Academician Peter Kuzmich Anokhin). *Rossiiskii mediko-biologicheskii vestnik im. akad. I.P. Pavlova*. 2018; (1). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/p-k-anohin-sozdatel-teorii-funktsionalnoy-sistemy-k-120-letiyu-so-dnya-rozhdeniya-akademika-petra-kuzmicha-anohina> (In Russian)
4. Korol E.A., Dudina A.G., Petrosyan R.S. Systematization of Conceptual Apparatus for Technological Efficiency of Construction Systems in Scientific and Methodological Literature. *Zhishchnoye stroitel'stvo*. 2024; (7): 32–37. (In Russian)
5. Korol E.A., Dudina A.G., Petrosyan R.S. Variable Approaches to Assessing Manufacturability of Construction Systems. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2024; 14 (3): 119–130. (In Russian)
6. Korol E.A., Rimshin V.I. Operation of Engineering Networks, Systems and Equipment. *Ekspluatatsiya inzhenernykh setei, sistem i oborudovaniya*. Moscow: ASV. 2023. 406 p. (In Russian)
7. Prodous O.A., Shlychkov D.I., Chelonenko A.G. Classification of Sewer Networks by Sediment Layer Thickness in Trough Part of Pipes. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2024; 14 (1): 96–104. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-1-96-104 (In Russian)
8. Telichenko V.I., Korol E.A., Kagan P.B., Kulikova E.N. System Engineering of Target Construction Management Programs. Moscow: DIA, 2010. 224 p. (In Russian)
9. Gusakov A.A. (Ed.), Bogomolov Yu.M., Brekhman A.I., Vaganyan G.A. System Engineering of Construction. Encyclopedia. Dictionary. 2nd edn. Moscow, 2004. 319 p. (In Russian)
10. Sudkov K.V., Gusakov A.A. (Eds.). Information Models of Functional Systems. Moscow: Novoe tysyacheletie, 2004. Pp. 7–114. (In Russian)
11. Mokhov A.I. Different System and Complex Engineering Approaches to Creation of Engineering Systems. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*. 2011; 7 (1): 3–7. (In Russian)

Сведения об авторах

Мохов Андрей Игоревич, докт. техн. наук, профессор, Государственный университет «Дубна», 141982, г. Дубна, ул. Университетская, 19, anmokhov@mail.ru

Дмитрий Иванович Шлычков, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26. SHlyichkovDI@mgsu.ru

Челоненко Андрей Геннадьевич, аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, andreicelonenco@mail.ru

Кондрашова Софья Владимировна, магистрант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, sonyakondrashova2002@gmail.com

Authors details

Andrey I. Mokhov, DSc, Professor, Dubna State University, 19, Universitetskaya Str., 141982, Moscow, Dubna, Russia, anmokhov@mail.ru

Dmitriy I. Shlychkov, PhD, A/Professor, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia. SHlyichkovDI@mgsu.ru

Andrey G. Chelonenko, Research Assistant, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, andreicelonenco@mail.ru

Sofya V. Kondrashova, Graduate Student, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia. sonyakondrashova2002@gmail.com

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 17.12.2025
Одобрена после рецензирования 14.01.2026
Принята к публикации 30.01.2026

Submitted for publication 17.12.2025
Approved after review 14.01.2026
Accepted for publication 30.01.2026

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.
2026. Т. 28. № 1. С. 249–259.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 249–259.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.095.072.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-249-259

EDN: SGLGYD

К РАСЧЕТУ НЕСУЩИХ БАЛОК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ ТРУБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ

Владимир Михайлович Картопольцев

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

ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Расширение диапазона длин применяемых пролетных строений металлических мостов с балками трубчатого сечения указывает на необходимость уточнения расчета на современные нагрузки, при воздействии которых не исключается появление в работе балок клавишного эффекта. Сложное напряженное состояние в работе таких пролетных строений предопределяет их пространственную работу изменением поперечного давления на балки при изгибно-крутильном деформировании и отражает тем самым новизну и актуальность рассматриваемых в статье исследований.

Цель работы. Для пролетных строений из балок трубчатого сечения, обладающих пониженной жесткостью в условиях сложного нагружения, отследить проявление изгибно-крутильных деформаций и клавишного эффекта.

Результаты. Был усовершенствован расчет для создания «устойчивости» пролетных строений из труб для различных диапазонов отношения $\frac{h_b}{L} = \left(\frac{1}{11} \dots \frac{1}{30} \right)$ и $\frac{B}{L} > 0,5$.

Ключевые слова: балка, труба, пролетное строение, нагрузка, давление, жесткость

Для цитирования: Картопольцев В.М. К расчету несущих балок пролетных строений мостов трубчатого сечения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 249–259. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-249-259. EDN: SGLGYD

ORIGINAL ARTICLE

STRENGTH ANALYSIS OF LOAD-BEARING BEAMS OF TUBULAR BRIDGES

Vladimir M. Kartopol'tsev

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

Abstract. The length expansion of the tubular bridge spans indicates the need to improve the strength analysis of modern loads, which do not exclude a keyboard effect in the beam operation.

Purpose: The purpose of this work is to study bending and torsion deformation and the keyboard effect in tubular bridge spans with reduced rigidity under difficult loading conditions.

Research findings: The theoretical calculation for the stability of bridge spans is improved within the different range of $\frac{h_b}{L} = \left(\frac{1}{11} \dots \frac{1}{30} \right)$ and $\frac{B}{L} > 0,5$ relations.

Value: A complex stress state of such bridge spans determines their spatial operation by changing the transverse pressure on the beams during bending and torsion deformation, and thus reflects the novelty and relevance of the research considered in the article.

Keywords: beam, pipe, superstructure, load, pressure, stiffness

For citation: Kartopol'tsev V.M. Strength Analysis of Load-Bearing Beams of Tubular Bridges. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 249–259. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-249-259. EDN: SGLGYD

Теоретические исследования и расчет пролетных строений основаны на алгоритмах напряженно-деформированного состояния для широких мостов при $\frac{B}{L} > 0,5$. Поперечное сечение пролетного строения из металлических труб под действием суммарной нагрузки претерпевает деформации по принципу «балка на упругих опорах». Трубчатые пролетные строения относятся к унифицированным пролетным строениям с пониженной строительной высотой и обладают относительно небольшой поперечной и деформативной изгибной жесткостью с параметрами отношения $\frac{h_b}{L} = \left(\frac{1}{11} \dots \frac{1}{30} \right)$ с узлами опирания поперечного сечения (рис. 1) [1].

Клавишный эффект в балочных металлических мостах с пролетными строениями из труб проявляется как последовательное дополнительное кручение конструкции по всей ширине моста и в опорных сечениях несущих балок. Он возникает вследствие изменения условий работы и нарушения равновесного состояния при передаче нагрузки на балки с измененными жесткостными

параметрами сечения. Так, например, для опорного сечения (рис. 1, б) жесткостной параметр α будет равен

$$\alpha = \frac{a^3}{6E \cdot I_{\text{тр}} \cdot f}, \quad (1)$$

где a – расстояние между трубами в поперечном сечении пролетного строения; $I_{\text{тр}}$ – момент инерции сечения трубы; f – прогиб балки от единичной равномерно распределенной по длине нагрузки ($g = 1$ кН/м), равный

$$f = \frac{L^4 (x - 2x^3 + x^4)}{24EI_{\text{тр}}}, \quad (2)$$

где x – координаты сечения по длине балки с равными значениями прогиба; E – модуль упругости материала трубы.

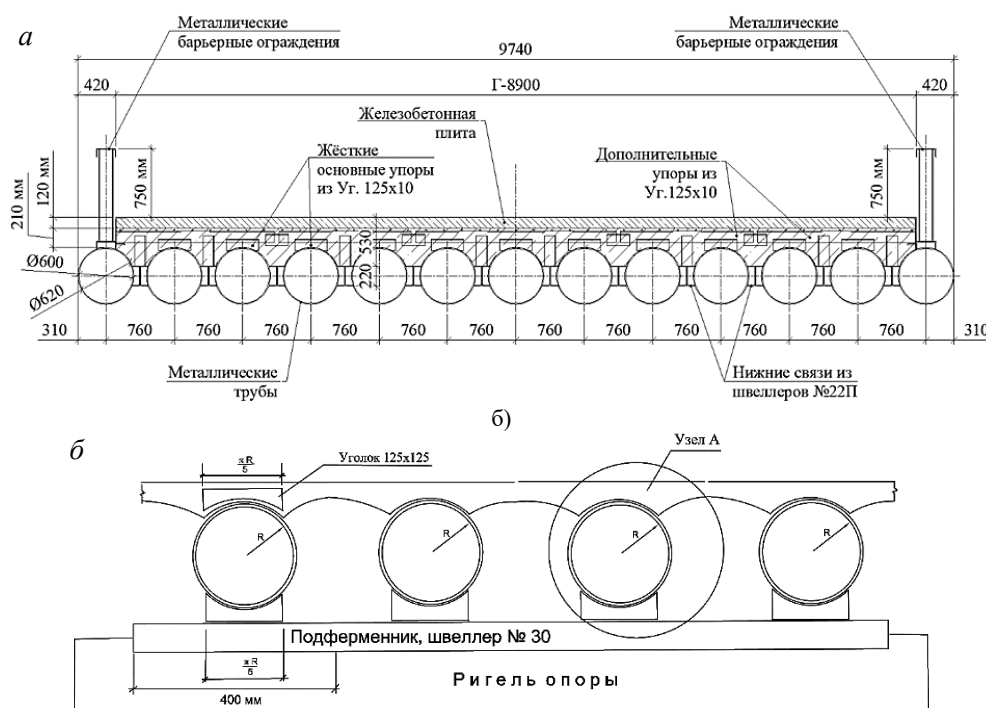


Рис. 1. Поперечное сечение пролетного строения из труб:

a – типовое решение из труб; b – общий вид опирания труб в опорных сечениях

Fig. 1. Cross-section of tubular bridge span:

a – common design solution; b – general view of tube supports

Степень неравномерности проявления прогиба балок с учетом кручения опорного сечения будет характеризоваться изменением коэффициента α в виде

$$\alpha = \frac{4I \cdot a^3}{I_{\text{тр}} \cdot L^4 (x - 2x^3 + x^4)}. \quad (3)$$

Для разрезного пролетного строения при $\frac{B}{L} > 0,5$ значение α равно

$$\alpha = 12,8 \frac{a^3}{L^4} \frac{E \cdot I_{\text{тр}}}{EI}, \quad (4)$$

где EI – жесткость объединенного с проезжей частью сечения трубы.

Коэффициент неравномерности проявления изгибно-крутильных деформаций для балок трубчатого сечения K_{∞} рекомендуется определять в зависимости от изменения формы линии влияния давления на балки (рис. 2).

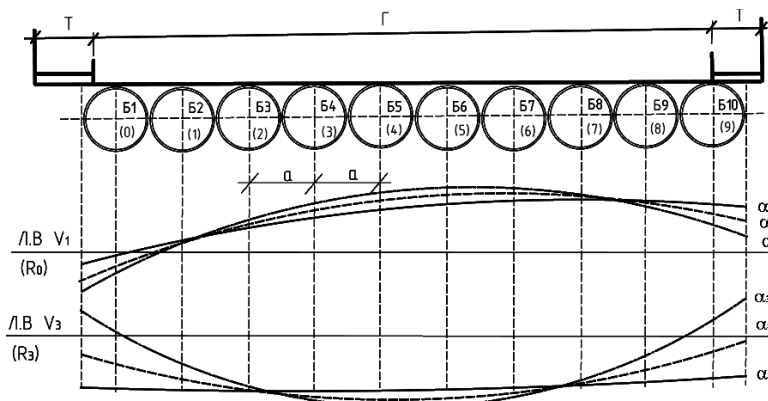


Рис. 2. Формы линий влияния давления на главные балки (трубы)

Fig. 2. Pressure curves for the main beams (tubes)

Для пролетных строений с количеством труб от 7 и более (см. рис. 1, а) коэффициент $1,5(\alpha)0,005$, причем при $\alpha > 0,005$ линия влияния опорных давлений уже практически имеет криволинейную форму [2].

Значения коэффициента неравномерности изгибно-крутильного деформирования балок из труб приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Значения K_{∞} при различных габаритах проезжей части

Table 1

K_{∞} values at different roadway size

Кол-во главных балок	Значение K_{∞} при габарите проезжей части					
	Г-6	Г-7	Г-8	Г-9	Г-12	Г-15
3	1,52	1,60	1,75	1,81	2,0	2,1
4	1,33	1,41	1,46	1,49	1,57	1,71
5	1,67	1,85	2,00	2,08	2,33	2,46
6	1,50	1,58	1,70	1,75	1,88	1,95
7	1,74	1,96	2,13	2,22	2,50	2,65
8	1,57	1,74	1,86	1,92	2,08	2,18
9	1,83	2,01	2,18	2,28	2,58	2,75
10	1,65	1,86	1,96	2,03	2,24	2,33

Таблица 2

Значения коэффициента K_∞ в зависимости от α и габарита проезжей части

Table 2

 K_∞ values vs. α and different roadway size

Число балок	Значение коэффициентов неравномерности K_∞ при									
	Г-6		Г-7		Г-8		Г-9		Г-12	
	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,05$
3	1,56	1,55	1,74	1,73	1,88	1,87	1,95	1,94	2,16	2,15
4	1,31	1,26	1,39	1,34	1,45	1,38	1,51	1,43	1,67	1,57
5	1,60	1,36	1,80	1,36	1,95	1,48	2,02	1,54	2,22	1,73
6	1,38	1,21	1,55	1,30	1,70	1,37	1,75	1,42	1,90	1,57
7	1,63	1,05	1,77	1,14	1,80	1,18	1,89	1,25	2,15	1,46
8	1,45	0,88	1,63	1,13	1,70	1,43	1,77	1,46	1,98	1,55
9	1,46	1,00	1,59	1,00	1,67	1,00	1,75	1,06	1,97	1,23

Таким образом, клавишный эффект возникает вследствие неравномерного распределения нагрузки между балками, что приводит к изменению давления, приходящегося на каждую из них. Введение изменений в деформированное состояние балок с учетом изгибно-крутильного поведения сечения балок при $x=0$ и $x=L/2$ позволяет перейти от метода поперечной установки нагрузки (метод КПУ) к определению давления на балку с использованием коэффициента α и K_∞ в методе упругих опор с коэффициентом неравномерности, учитывающим пространственную работу трубчатого пролетного строения, K_∞ при этом [3, 4] равен

$$K_\infty = \frac{t \cdot \beta}{n} + \frac{t \cdot e_0 \cdot x_i \cdot y_i}{I}, \quad (5)$$

где $x_i; y_i$ – ординаты давления нагрузки на балки трубчатого сечения вдоль и поперек пролетного строения; t – число колонн нагрузки; n – число балок в сечении пролетного строения; I – момент инерции сечения пролетного строения; e_0 – эксцентриситет равнодействующей нагрузки по отношению к оси симметрии пролетного строения; β – коэффициент из работы [5].

Для пространственной работы трубчатого пролетного строения с учетом влияния изгибно-крутильной жесткости проявление давления в балочной системе в виде клавишного эффекта выражается определением КПУ [6]. Синхронность и последовательность проявления прогибов в балках по ширине пролетного строения будет характеризоваться формулой

$$f_{изг.кр}^i = 1,5\alpha \cdot \varphi_{ср}, \quad (6)$$

где $\varphi_{ср} = \frac{M_{кр} \cdot L^3}{48EI^\omega}$; I^ω – бимомент объединенного сечения.

Исходим из условия, что давление на балку трубчатого сечения пролетного строения P_{0x_i} в любой точке с координатой $x_i; y_i$ будет равно $P_{0x_i} = \rho \cdot R_a^I \cos \varphi$; ρ – удельная плотность материала трубы; R_a^I – внутренний радиус трубы (рис. 3).

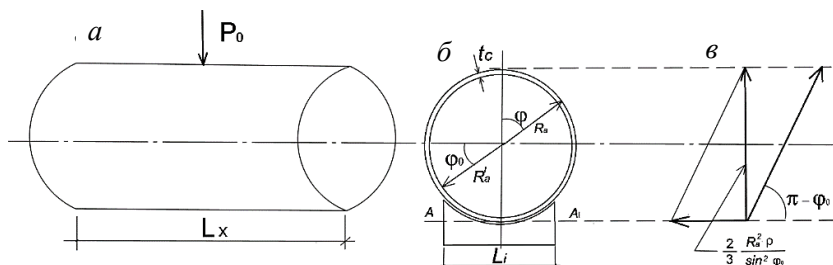


Рис. 3. Расчетная схема к определению давления на трубу:

a – по длине пролета; b – расчетные параметры для трубы в зависимости от типа опирания; c – расчетные параметры распределения давления на трубу

Fig. 3. Design scheme of the tube pressure:

a – along span length; b – depending on the support type; c – pressure distribution over the tube

Значения изгибающего момента M_{xi} , поперечной силы Q_{xi} и крутящего момента $M_{крxi}$ будут равны соответственно

$$M_{xi} = \frac{P_{0x_i}}{4\beta}; \quad Q_{xi} = -\frac{P_{0x_i}}{2} \theta; \quad M_{крxi} = 2\pi \cdot R_a^2 \cdot t_c \cdot \tau_{xy}, \quad (7)$$

где $\beta = \frac{E \cdot t_c}{4R_a^2 \cdot E \cdot I_{тр}}$; R_a – средний радиус для трубы; τ_{xy} – касательные напряжения в рассматриваемом сечении, обратно пропорциональные толщине стенки трубы t_c и прогибу y_6 балки [7].

Тогда передаточный угол скручивания в процессе клавишного эффекта (рис. 3, b, c) и прогиб $y_6 = \frac{P_{0x_i}}{8\beta^3 \cdot EI_{тр}}$ будет равен

$$\varphi = \varphi_{кр} = 2G \cdot \Theta \cdot A_{тр}, \quad (8)$$

где $G = \frac{E}{3}$; $\Theta = \frac{M_{крxi} \cdot L_x}{4A^2 \cdot G \cdot t_c}$; $EI_{тр}$ – жесткость трубчатого сечения балки на изгиб

с кручением $EI_{тр} = \frac{E \cdot t_c^3}{12(1-\mu^2)}$; $A = \frac{A_R + A_r}{2}$ – средняя арифметическая площадь поверхности трубы.

Принимаем справедливость зависимости растягивающих напряжений

σ_p от крутящего момента в виде $\sigma_p = \frac{3M_{крxi}}{2\pi \cdot R_a \cdot t_c^2}$ и имеем

$$\tau_{xy} = G \cdot \Theta \cdot R_a^I. \quad (9)$$

В процессе испытания автодорожного моста с пролетным строением из труб $\varnothing = 1020$ мм и схемой $3 \times 24,0$ м при упругом и упругопластическом состоянии (рис. 4, табл. 3) фиксировалось опосредованное прокручивание балок из труб как по длине пролета, так и в опорном сечении.

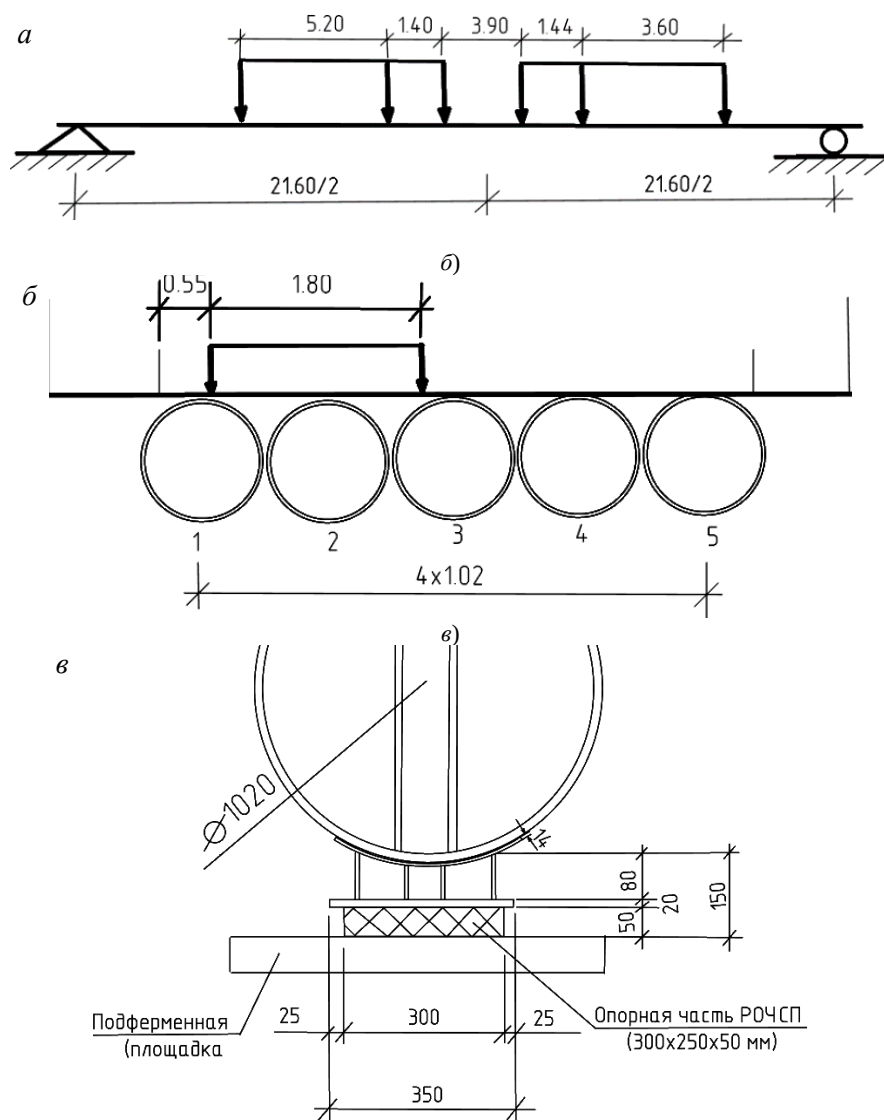


Рис. 4. Нагрузочные и конструктивные решения при исследовании клавишного эффекта: а – схема продольного нагружения; б – схема поперечного нагружения пролетного строения испытательной нагрузкой; в – конструкция узла опорного сечения для балок трубчатого сечения

Fig. 4. Load and design solutions for the keyboard effect: а – longitudinal load; б – transverse load; в – support section for tubular beams

Таблица 3

Значения упругих и остаточных прогибов балок от испытательной нагрузки

Table 3

Elastic and residual beam bending after loading

Значения прогибов, мм	Параметры главных балок				
	1	2	3	4	5
Упругих	45,0	39,5	24,5	11,7	3,6
Остаточных	4,5	3,5	2,5	0,95	0,15

Уравнение равновесия сечения трубы при закручивании на длине l_{xi} будет иметь вид

$$\frac{N_{\varphi}}{r} + \frac{N_{xi}}{R_a} = -\frac{P_{0xi}}{n}. \quad (10)$$

Для опорного сечения условие (10) запишем в следующем виде [8]:

$$2\pi \cdot R_a \cdot N_{\varphi} \sin \varphi + P_{оп} = 0, \quad (11)$$

где $P_{оп} = p \cdot R_a (1 - \cos \varphi)$ – давление на трубу в опорном сечении; n – количество труб в сечении пролетного строения; $N_{\varphi} = P_{оп} \cdot R_a = \gamma \cdot R_a^2 \cos \varphi$; $N_{xi} = -\frac{P_{0xi} \cos \varphi}{4R_a} (L^2 - 4x_i^2)$; L – длина балки; r – внутренний радиус сечения трубы.

Прокручивание трубы в опорном сечении при изгибно-крутильном деформировании соответствует условию

$$\sigma_z^2 + k_o (\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) = \sigma_T^2, \quad (12)$$

где $k_o = 3$; $\tau_{xz} = G \cdot \gamma_{xz}$; $\gamma_{xz} = \varphi \cdot y_i$; $\tau_{yz} = G \cdot \gamma_{yz}$; $\gamma_{yz} = \varphi \cdot x_i$; φ – относительно возможный угол закручивания сечения балки; x_i определяется из условия $\frac{\tau_{yz}}{\sigma_z} = \frac{\varphi}{3\varepsilon_z}$; y_i определяется из условия $\frac{\tau_{xz}}{\sigma_z} = \frac{\varphi}{3\varepsilon_z}$; σ_z , τ_{xz} , τ_{yz} принимаются из работы [9].

Для опорного сечения в экспериментальных условиях (см. рис 4, в) значения τ_{xz} определялись по формуле

$$\tau_{xz} = \frac{2M_{кр}}{\pi \cdot \varnothing_{внеш}^3}, \quad (13)$$

где $\varnothing_{внеш}$ – наружный диаметр трубы.

Предельная величина деформаций при скручивании опорного сечения ε_z равна

$$\varepsilon_z = \frac{1}{3G} \sigma_z. \quad (14)$$

Для балок трубчатого сечения конечной длины изгибно-крутильные деформации остаются плоскими и перпендикулярными к оси за счет обеспечения приложения на торцах (опорных сечений) нормативных сил N_i , симметричных относительно оси трубы. Равнодействующая этих сил $N = P_o (R'_a)^2$ определяется величиной осевой деформации ε_z , предельная величина которой будет, как в (14).

Представляя упругопластическую область в поперечном сечении трубы в виде кольца, а радиус границы, разделяющий упругую и пластическую области через $r_{\varepsilon T}$, значения главного напряжения σ_z [10] принимаем в виде

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_t}{2}, \quad (15)$$

где σ_r – радиальное напряжение в сечении трубы; σ_t – окружное напряжение.

При условии пластичности в виде $\sigma_z - \sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t$ и краевых условиях

$$R_a = r_T \cdot \sigma_z = \sigma_r, \quad r = 2t, \quad \sigma_z = \sigma_t.$$

Значение напряжений в пластической части сечения трубы будет определяться из решения дифференциального уравнения равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dR_a} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{R_a} = 0. \quad (16)$$

Условие равновесия с учетом условия пластичности принимается в виде

$$\frac{d\sigma_r}{dR_a} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_t}{R_a}. \quad (17)$$

Составляющие компоненты напряжений при изгибно-крутильном деформировании в опорном сечении будут определяться соответственно

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t \left(l_n \frac{R_a}{r_{\varepsilon T}} \right); \\ \sigma_t &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t \left(l_n \frac{R_a}{r} \right), \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где r – внутренний радиус трубы; σ_t – предел текучести стали трубы.

При пластических деформациях внешней поверхности трубы, равной 0,001 (см. табл. 3), нормальные напряжения σ_H [11] равны

$$\sigma_k = 2k \cdot l_n \frac{\varnothing_k}{\varnothing_b}, \quad (19)$$

где $k = 0,5 \sigma_t$ – по теории касательных напряжений; $\varnothing_k$ – наружный диаметр трубы; $\varnothing_b$ – внутренний диаметр трубы.

Внутренняя часть трубы, испытывающая упругое деформирование, показала напряжение, равное $\sigma_{в.у}^э$, с теоретическим расчетом по формуле из работы Н.Н. Малинина [12]:

$$\sigma_{в.у}^э = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{\varnothing_K^2}{\varnothing_B^2} \right). \quad (20)$$

Выводы

Приведенные результаты исследования и расчета верны в том случае, когда коэффициент поперечной установки (КПУ) определяется методом упругих опор с учетом изменения ординат линий влияния давления от нагрузки, полученных с учетом изменения коэффициента α .

Эффективность учета пространственной работы несущих балок трубчатого сечения при проявлении клавишного эффекта выражается в снижении изгибающих моментов и одновременном умеренном росте крутящего момента в сечениях балок – как по длине пролета, так и в опорных сечениях. В этом случае величина ординат линий влияния давления на балки изменяется пропорционально изменению коэффициента α .

Проверить решение можно при условии, что балка трубчатого сечения подвержена в основном изгибу, и пренебречь растяжением в срединной плоскости с ограничениями, наложенными на компоненты линейных и угловых смещений. Принятые допущения, касающиеся степени распространения упругопластических деформаций в сечениях трубы по длине пролета, основаны на гипотезе, что деформации и прогибы являются функциями только радиуса R_a , а главными напряжениями считаются радиальное σ_r , окружное σ_t и осевое σ_z .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петрова Г.В. Совершенствование статического расчета сталежелезобетонных пролетных строений мостов малых пролетов из труб : специальность 05.23.11. «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, мостов и транспортных тоннелей» : автореферат магистерской диссертации. Томск, 2017. 17 с.
2. Петрова Г.В., Картопольцев В.М. К расчету пролетных строений сталежелезобетонных мостов из труб методом упругих опор // Материалы 63-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2017. С. 219–221.
3. Семенец Л.В. Пространственные расчеты плитных мостов. Киев : Издательское объединение «Вища школа», 1976. 161 с.
4. Козлов И.Г., Раткин В.В., Щербаков А.Г. Экспериментально-теоретические исследования пространственной работы пролетных строений мостов. Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2006. 29 с.
5. Осипов В.С. Справочные таблицы для расчета неразрезных балок на упруго оседающих опорах. Москва : Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1953. 123 с.
6. Алексеев А.А., Картопольцев А.В. Совершенствование расчета несущих балок трубчатого сечения пролетных строений металлических мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 28. № 1. С. 227–241.
7. Снеддон П.Н., Берри Д.С. Классическая теория упругости. Москва : Государственное изд-во физико-математической литературы, 1961. 219 с.
8. Федосеев В.Н. Сопротивление материалов. Москва : Наука, 1974. 559 с.
9. Тимошенко С.П., Лессельс Д. Прикладная теория упругости. Ленинград : Государственное научно-техническое изд-во, 1931. 393 с.

10. Безухов Н.П. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. Москва : Высшая школа, 1968. 511 с.
11. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки. Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1948. 460 с.
12. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Москва : Машиностроение, 1975. 398 с.

REFERENCES

1. Petrova G.V. Improvement of static analysis of steel-concrete small-span tubular bridges. MS Abstract. Tomsk, 2017. 17 p. (In Russian)
2. Petrova G.V., Kartopoltsev V.M. Tubular Bridge Spans Design based on Elastic Support Method. In: *Proc. 63rd Univ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists*. Tomsk: TSUAB, 2017. Pp. 219–221. (In Russian)
3. Semenets L.V. Spatial Analysis of Slab Bridges. Kiev: Vishcha shkola, 1976. 161 p. (In Russian)
4. Kozlov I.G., Ratkin V.V., Shcherbakov A.G. Experimental and Theoretical Studies of the Spatial Operation of Bridge Spans. Saratov State Technical University, 2006. 29 p. (In Russian)
5. Osipov V.S. Reference Tables for Calculating Uncut Beams on Elastically Sagging Supports. Moscow: Stroiizdat, 1953. 123 p. (In Russian)
6. Alekseev A.A., Kartopol'tsev A.V. Improvement of Load-Bearing Tubular Beam Section Analysis of Bridge Spans. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27 (6): 227–241. (In Russian)
7. Sneddon J.N., Berry D.S. Classical Theory of Elasticity. Moscow: Fizmatlit, 1961. 219 p. (Russian translation)
8. Fedoseev V.N. Resistance of Materials. Moscow: Nauka, 1974. 559 p. (In Russian)
9. Timoshenko S.P., Lessels D. Applied Theory of Elasticity. Leningrad: Gostekhizdat, 1931. 393 p. (In Russian)
10. Bezukhov N.P. Fundamentals of the Theory of Elasticity, Plasticity and Creep. Moscow: Vysshaya shkola, 1968. 511 p. (In Russian)
11. Timoshenko S.P. Plates and Shells. Moscow; Leningrad: Gostekhizdat, 1948. 460 p. (In Russian)
12. Malinin N.N. Applied Theory of Plasticity and Creep. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 398 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет., 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; ООО «Диамос», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Author Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; ООО "DIAMOS", 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2025
Одобрена после рецензирования 21.10.2025
Принята к публикации 22.01.2026

Submitted for publication 30.09.2025
Approved after review 21.10.2025
Accepted for publication 22.01.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 260–270.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 260–270.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.855.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-260-270

EDN: STROAU

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВЕРХНЕГО СЛОЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ

**Виталий Евгеньевич Сиволап, Сергей Владимирович Ефименко,
Владимир Николаевич Ефименко, Владимир Сергеевич Чурилин,
Алексей Владимирович Сухоруков, Заур Рашидович Галяутдинов,
Александр Дмитриевич Башарин**

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

Аннотация. *Актуальность.* Существующие нормативные документы (ГОСТ Р 71404–2024 и др.), регламентирующие расчет дорожных одежд на морозоустойчивость, не учитывают деформационно-прочностные характеристики асфальтобетона и основываются на данных, не отражающих специфику сложных природно-климатических условий юго-востока Западной Сибири. Это приводит к занижению минимальных расчетных температур верхнего слоя покрытия (ВСП), необоснованному завышению требований к битумному вяжущему и росту стоимости дорожного строительства.

Цель. Оценка достоверности действующих нормативных методик определения минимальной расчетной температуры ВСП и сравнение их с альтернативным методом – зависимостью Робертсона – для условий юго-востока Западной Сибири.

Методы. Проведены расчеты минимальной расчетной температуры ВСП по методикам ГОСТ Р 71009–2023 и ГОСТ Р 58400.3–2025, а также по эмпирической зависимости Робертсона. Полученные результаты сопоставлены с фактическими данными температуры покрытия, зарегистрированными автоматической дорожной метеостанцией за трехлетний период наблюдений (2023–2025 гг.) на участке автодороги Р-255 «Сибирь». Анализ климатических данных выполнен на основе архивов погоды за 24-летний период для сети метеостанций региона.

Результаты. Установлено, что нормативные методики, основанные на анализе экстремальных минимальных суточных температур воздуха, приводят к занижению расчетной температуры ВСП на 22–27 % относительно фактически измеренных значений. В ряде случаев расчетные значения оказались ниже средних минимальных годовых температур воздуха, что противоречит физике теплообмена. Зависимость Робертсона, использующая температуру наиболее холодной пятидневки, показала значительно лучшую сходимость с фактическими данными, с отклонением всего 0,3–5,3 %.

Ключевые слова: автомобильная дорога, асфальтобетонное покрытие, минимальная расчетная температура верхнего слоя покрытия, морозоустойчивость, температура воздуха

Для цитирования: Сиволап В.Е., Ефименко С.В., Ефименко В.Н., Чурилин В.С., Сухоруков А.В., Галаяутдинов З.Р., Башарин А.Д. Оценка достоверности действующих методик определения минимальных расчетных температур верхнего слоя асфальтобетонного покрытия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 260–270. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-260-270. EDN: STROAU

ORIGINAL ARTICLE

ACCURACY ASSESSMENT OF MINIMUM DESIGN TEMPERATURES FOR ASPHALT CARPET

Vitaliy E. Sivolap, Sergey V. Efimenko, Vladimir N. Efimenko,
Vladimir S. Churilin, Aleksei V. Sukhorukov, Zaur R. Galyautdinov,
Aleksandr D. Basharin

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Regulatory documents (GOST R 71404–2024) governing the pavement design for frost resistance do not consider the stress-strain state of asphalt concrete and are based on data that do not reflect natural and climatic conditions of the southeastern part of Western Siberia. This leads to an underestimation of the minimum design temperatures for asphalt carpet, unjustifiably stringent requirements for bituminous binder, and increased road construction costs.

Purpose: To assess the reliability of regulatory methods for the minimum design temperature of the asphalt carpet and compare them with an alternative method—the Robertson dependence—for the conditions of southeastern Western Siberia.

Methodology: Calculations of the minimum design temperature were based on GOST R 71009–2023 and GOST R 58400.3–2025, and the empirical Robertson dependence. The obtained results were compared with the actual pavement temperature recorded by an automatic road weather station over a three-year observation period (2023–2025) on a section of the R-255 "Sibir" highway. The data was based on 24-year weather recordings for the regional network of meteorological stations.

Research findings: It is shown that regulatory methods, based on the analysis of extreme minimum daily air temperatures, lead the design temperature underestimation by 22–27% compared to the actual values. In some cases, the calculated values are lower than the average minimum annual air temperatures, which contradicts the heat exchange physics. The Robertson dependence, which uses the temperature of the coldest five-day period, shows significantly better agreement with the actual data, with a deviation within 0.3–5.3%.

Keywords: automobile road, asphalt concrete, minimum design temperature, reliability, air temperature

For citation: Sivolap V.E., Efimenko S.V., Efimenko V.N., Churilin V.S., Sukhorukov A.V., Galyautdinov Z.R., Basharin A.D. Accuracy Assessment of Minimum Design Temperatures for Asphalt Carpet. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 260–270. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-260-270. EDN: STROAU

Природно-климатические условия территории юго-востока Западной Сибири, включающей в себя Томскую, Новосибирскую, Кемеровскую области, Алтайский край и Республику Алтай, считаются сложными [1]. Использование в строительстве переувлажненных глинистых грунтов и недостаточная морозоустойчивость дорожных одежд (в том числе капитального типа) являются при-

чиной недостаточной надежности дорожных конструкций, что обуславливает чрезмерные затраты на восстановление требуемых транспортно-эксплуатационных показателей [2–4]. Существующие нормативные документы, в частности ГОСТ Р 71404–2024¹, базируются на исследованиях, проведенных в европейской части России, и не учитывают особенностей геокомплекса юго-востока Западной Сибири. Кроме того, рекомендации по допустимой величине морозного пучения, приведенные в ГОСТ Р 59120–2021² для марок битума и асфальтобетона, основаны на сведениях, полученных в шестидесятые годы прошлого столетия [5].

Изменение технологий производства вяжущих, а соответственно, свойств современных видов асфальтобетона, наиболее часто используемых на территории юго-востока Западной Сибири, таких, например, как А16Вн, позволяет считать актуальным уточнение диапазона расчетных отрицательных температур верхних слоев покрытия (ВСП). Существующие методики его определения, регламентированные действующими нормативными документами ГОСТ Р 71009–2023³, ГОСТ Р 58400.3–2025⁴, основаны на анализе массива минимальных суточных температур воздуха. Данный подход приводит к фиксации статистических выбросов – аномально низких температур за отдельные сутки в рассматриваемом году. В результате указанного подхода происходит необоснованное занижение минимальной расчетной температуры ВСП, что, в свою очередь, приводит к завышению требований к асфальтобетонной смеси и, как следствие, к неоправданному росту ее стоимости из-за изменения марки битумного вяжущего.

При определении деформационных и прочностных характеристик асфальтобетона учитывают значения минимальной расчетной температуры ВСП [6, 7]. По методике, представленной в ГОСТ Р 71009–2023³, применяют данные о минимальных годовых температурах воздуха T_i , °С за 24-летний период, полученные по сведениям метеостанций, расположенных в районе исследования, дислокация которых отражена на рисунке.

Для валидации результатов, полученных по нормативной методике, были проанализированы фактические данные о минимальных температурах из открытых источников. На основе открытых климатических ресурсов были собраны ряды минимальных суточных температур воздуха за зимние месяцы для каждого года в период с 2001 по 2025 г. Для каждого года определялось минимальное годовое значение температуры воздуха, на основе которого затем было рассчитано среднее значение за 24-летний период. В результате сравнения установлено, что полученные расчетные значения минимальных температур

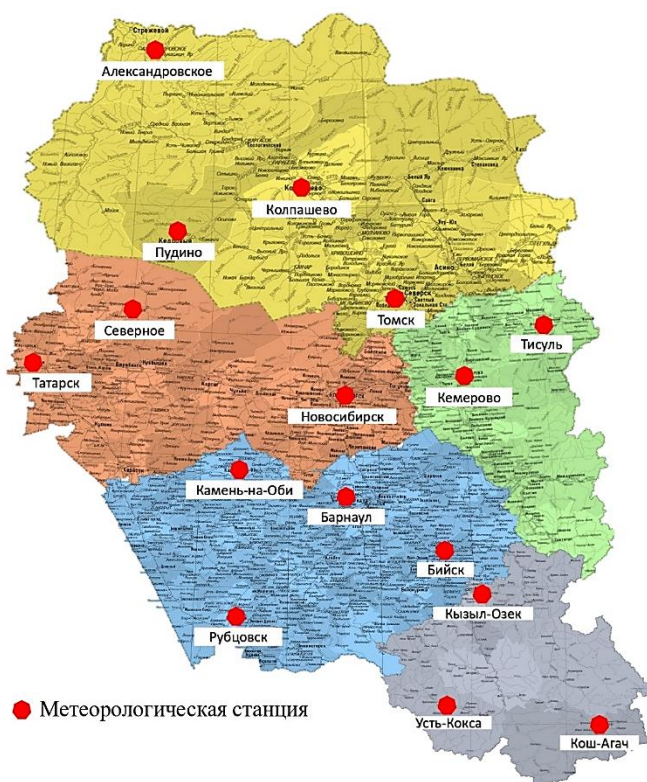
¹ ГОСТ Р 71404–2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Введ. 05.08.2024. Москва: Российский институт стандартизации, 2024. 147 с.

² ГОСТ Р 59120–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования. Введ. 01.05.2021. Москва: Стандартинформ, 2021. 24 с.

³ ГОСТ Р 71009–2023. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Правила выбора марок. Введ. 01.02.2024. Москва: Российский институт стандартизации, 2023. 46 с.

⁴ ГОСТ Р 58400.3–2025. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Порядок определения марки. Введ. 01.06.2025. Москва: Российский институт стандартизации, 2025. 20 с.

асфальтобетонного покрытия оказались ниже средних значений минимальных годовых температур воздуха [8]. Это свидетельствует о том, что стандартизированная методика рекомендует фиксировать статистические выбросы (экстремально низкие температуры за отдельные сутки), что приводит к занижению расчетной температуры ВСП.



Карта-схема дислокации метеорологических станций на территории исследования
Map of meteorological station locations

При определении минимальной расчетной температуры для верхних слоев покрытия по методике, представленной в ГОСТ Р 71009–2023, применяют данные о минимальных годовых температурах воздуха T_i , °C за 24-летний период, полученные с метеостанций, расположенных в районе исследования. Отметим, что 24-летний интервал выбран в соответствии с межремонтным периодом для капитального типа покрытия дорожных одежд. Среднее значение минимальных годовых температур $T_{\min}$ вычисляют по формуле

$$T_{\min} = \sum_{i=1}^{24} \frac{T_i}{24}, \quad (1)$$

где T_i – минимальная годовая температура в i -й год наблюдения, °C.

Стандартное отклонение минимальных годовых температур воздуха s вычисляют по формуле

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(T_i - T_{\min})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где n – количество лет наблюдений ($n = 24$ для 24-летнего периода); T_i – минимальная годовая температура в i -й год наблюдения, °С; $T_{\min}$ – среднее значение минимальных годовых температур воздуха, °С.

В зависимости от типа дорожной одежды принимается значение надежности N , по которому определяется значение аргумента функции стандартного нормального распределения Z . Значение требуемой надежности для капитального типа дорожных одежд – 98 %. Аргумент функции стандартного нормального распределения для надежности 98 % равен 2,055 [9]. Минимальная расчетная температура ВСП с надежностью 98 % TM_{98} , °С, по ГОСТ Р 71009–2023 и ГОСТ Р 58400.3–2025 определяется по одной методике, но временной период, за который определяются минимальные годовые температуры воздуха, отличается и составляет 24 года и 20 лет соответственно. Значение минимальной расчетной температуры ВСП вычисляется по формуле

$$TM_{98} = -1,56 + 0,72T_{\min} - 0,004(Lat)^2 + 6,26\log_{10}(H + 25) - Z(4,4 + 0,52s^2)^{0,5}, \quad (3)$$

где $T_{\min}$ – среднее значение минимальных годовых температур воздуха, °С; Lat – географическая широта участка расположения дороги, град; H – глубина слоя от поверхности автомобильной дороги, мм (для ВСП $H = 0$); s – стандартное отклонение минимальных годовых температур.

Методика определения минимальной расчетной температуры по ГОСТ Р 71009–2023 обязательна к применению при выборе битумного вяжущего, но есть и альтернативный способ определения, описанный в ГОСТ Р 58400.3–2025.

Существуют и иные методы определения минимальной расчетной температуры, они описаны в работе Г.Н. Кирюхина [10]. Одной из наиболее обоснованных экспериментально корреляционных зависимостей является формула Робертсона, которая связывает минимальную температуру поверхности асфальтобетонного покрытия и температуру воздуха наиболее холодной пятидневки [11]:

$$T_n^{\min} = 0,859T_{\min} + 1,7, \quad (4)$$

где $T_n^{\min}$ – минимальная температура асфальтобетонного покрытия, °С; $T_{\min}$ – температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С.

Данная зависимость (4) также отображена и в диссертационной работе В.С. Чурилина [12], что подтверждает возможность ее применения как альтернативы стандартизированному методу в природно-климатических условиях юго-востока Западной Сибири.

Для определения температуры покрытия применяют не только расчетные методики, но и специальные автоматические дорожные метеорологические станции, которые фиксируют температуру воздуха, скорость ветра, влажность и атмосферное давление, а также температуру дорожного покрытия. Одна из таких станций установлена на территории исследования (КМ 82+450 а/д Р-255

«Сибирь», Подъезд к г. Томску) и фиксирует метеорологические данные с начала 2023 г.

При определении минимальных расчетных температур ВСП по формуле (3) значения минимальных годовых температур воздуха за период с 2001 по 2025 г. приняты из архива погоды для метеостанций юго-востока Западной Сибири [13]. В результате расчета было зафиксировано, что значения минимальных расчетных температур ВСП для ряда районов территории исследования оказались ниже средних значений минимальных годовых температур воздуха в течение 24-летнего периода. Было установлено, что расчет минимальных температур воздуха несколько ниже средних значений наблюдений при возрастании значения надежности. Результаты расчета минимальных расчетных температур ВСП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения минимальных расчетных температур ВСП

Table 1

Minimum design temperatures of asphalt carpet

Расположение метеостанции	Регион	Координаты метеостанции		Среднее значение минимальных годовых температур воздуха за 24-летний период, °C	Минимальная расчетная температура ВСП, °C			Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °C	Минимальная температура асфальтобетонного покрытия, °C
		Широта	Долгота		для N 92 %	для N 95 %	для N 98 %		
Александровское	Томская область	60°43'	77°87'	–42,0	–43,2	–44,1	–45,7	–42,0	–34,4
Колпашево		58°32'	82°88'	–42,0	–41,7	–42,5	–44,0	–42,0	–34,4
Пудино		57°57'	79°43'	–42,6	–41,6	–42,4	–43,8	–38,0	–30,9
Томск		56°50'	84°92'	–37,7	–38,3	–39,3	–40,9	–39,0	–31,8
Северное	Новосибирская область	56°33'	78°37'	–39,9	–38,7	–39,5	–40,8	–39,0	–31,8
Татарск		55°22'	75°37'	–36,4	–36,4	–37,2	–38,7	–37,0	–30,1
Новосибирск		54°90'	82°93'	–37,7	–36,6	–37,4	–38,7	–37,0	–30,1
Тисуль	Кемеровская область	55°75'	88°30'	–40,8	–40,1	–41,1	–42,6	–39,0	–31,8
Кемерово		55°25'	86°22'	–40,0	–39,2	–40,1	–41,7	–39,0	–31,8
Камень-на-Оби	Алтайский край	53°82'	81°27'	–40,5	–38,5	–39,4	–40,8	–37,0	–30,1
Бийск		52°68'	85°12'	–40,3	–38,3	–39,2	–40,8	–37,0	–30,1
Барнаул		53°43'	83°53'	–38,0	–36,5	–37,4	–38,8	–36,0	–29,2
Рубцовск		51°58'	81°20'	–37,7	–36,0	–37,0	–38,5	–37,0	–30,1
Кызыл-Озек	Республика Алтай	51°90'	86°00'	–34,2	–32,7	–33,5	–34,8	–24,0	–18,9
Усть-Кокса		50°27'	85°36'	–37,0	–34,1	–34,9	–36,2	–36,0	–29,2
Кош-Агач		50°00'	88°67'	–42,2	–37,5	–38,3	–39,5	–42,0	–34,4

Примечание. Красным цветом выделены температуры ниже минимальной годовой температуры воздуха за 24-летний период; зеленым – выше этой температуры; оранжевым – минимальные температуры асфальтобетонного покрытия выше температуры воздуха наиболее холодной пятидневки.

Значения наиболее холодной пятидневки в годовом цикле необходимы для расчета минимальной температуры асфальтобетонного покрытия по формуле Робертсона. При выборе требуемого значения для территории исследования руководствовались нормативным документом СП 131.13330.2025⁵.

При вычислении минимальной расчетной температуры ВСП в качестве значения минимальной годовой температуры воздуха принимают экстремальные значения из архива погоды юго-востока Западной Сибири [14], из-за чего происходит занижение минимальной расчетной температуры ВСП автомобильных дорог.

Также при исследовании влияния отрицательной температуры воздуха на асфальтобетонное покрытие по формуле (4) рассчитана минимальная температура асфальтобетонного покрытия, представленная в табл. 1

Значения температуры покрытия, взятые со специальной автоматической дорожной метеорологической станции, можно принять как фактические. Проведено сравнение фактических данных температуры ВСП с расчетными значениями, определенными по нормативной документации, а также фактических данных с минимальной расчетной температурой, определенной по зависимости Робертсона. Результаты сравнения сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты сопоставления фактической температуры ВСП
со значениями, полученными расчетом**

Table 2

Asphalt carpet temperature vs. calculated values

Год наблюдений	Фактическая мин. температура покрытия, °С	Расчетная мин. температура покрытия, °С (ГОСТ Р 71009–2023)	Относительное различие между фактической и расчетной температурой, % (ГОСТ Р 71009–2023)	Расчетная мин. температура покрытия, °С (зависимость Робертсона)	Относительное различие между фактической и расчетной температурой, % (зависимость Робертсона)
2023	–31,7	–40,88	22,5	–31,80	0,3
2024	–30,1		26,4		5,3
2025	–34,2		26,6		4,4

Относительное различие между фактической минимальной и расчетной минимальной температурой покрытия ВСП за 3 года наблюдений составляет от 22,5 до 26,6 %. При сравнении расчетной минимальной температуры покрытия, определенной по уравнению Робертсона, и фактической температуры покрытия ВСП относительное различие варьируется от 0,3 до 5,3 %. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее достоверные результаты по определе-

⁵ СП 131.13330.2025. Строительная климатология. Москва: Российский институт стандартизации, 2025. 215 с.

нию минимальной расчетной температуры верхнего слоя асфальтобетонного покрытия получены по формуле Робертсона, обоснованной в США при разработке методологии «Суперпейв».

Предельная относительная деформация асфальтобетонного покрытия является функцией его минимальной расчетной температуры⁶. Согласно расчетам по методике (3), средняя минимальная расчетная температура верхнего слоя покрытия ВСП для юго-востока Западной Сибири составляет $-40,39^{\circ}\text{C}$. При этом для ряда районов исследуемой территории полученные значения минимальной расчетной температуры ВСП оказываются ниже минимальной годовой температуры воздуха, что противоречит физическим закономерностям теплообмена. В свою очередь, расчет по альтернативной методике (4) дает среднюю минимальную температуру покрытия, равную $-30,57^{\circ}\text{C}$. Расхождение между результатами двух методик достигает 24 %, что свидетельствует о значительной погрешности, заложенной в нормативный подход, и приводит к необоснованному завышению требований к битумному вяжущему.

Выводы

По методике, представленной в ГОСТ Р 71009–2023 и ГОСТ Р 58400.3–2025, значения расчетных отрицательных температур с повышением значения надежности превышали значения средних минимальных отрицательных температур воздуха. Такой расчет при выборе марки битумного вяжущего приводит к увеличению стоимости асфальтобетонной смеси.

Рассчитывая минимальную температуру асфальтобетонного покрытия по формуле Робертсона (4), используют значение температуры воздуха наиболее холодной пятидневки, что исключает возможность выбросов значений минимальной отрицательной температуры воздуха.

Таким образом, для дальнейшего изучения деформационных и прочностных характеристик асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог территории юго-востока Западной Сибири приняты минимальные температуры асфальтобетонного покрытия, рассчитанные по уравнению Робертсона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бляхарчук Т.А., Боброва А.И., Жилина Т.Н. Природно-климатические условия на юго-востоке Западной Сибири и развитие этнокультур Прикетья (V в. до н. э. – XVII в.) // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2021. № 4 (55). С. 36–48. DOI: 10.20874/2071-0437-2021-55-4-3. EDN: XLBNKQ
2. Ефименко В.Н. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог при глубоком промерзании грунтов (на примере Юго-Востока Западной Сибири) : специальность 05.22.03 «Изыскание и проектирование железных дорог и автомобильных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ефименко Владимир Николаевич. Москва, 1978. 216 с.
3. Шеслер А.И. Неравномерность деформации нежестких дорожных одежд под воздействием пучения – осадки грунтов : специальность 05.22.03 «Изыскание и проектирование

⁶ ГОСТ Р 58406.6–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения предела прочности на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения. Введ. 01.06.2020. Москва: Стандартинформ, 2020. 11 с.

- железных дорог и автомобильных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шеслер Анатолий Иванович. Москва : МАДИ, 1968. 181 с.
4. Шорин В.А., Каган Г.Л., Рахимова И.А. Сравнение результатов расчетов на морозоустойчивость дорожной конструкции по нормативной и предлагаемым методикам // Дороги и мосты. 2015. № 4. С. 76–86.
 5. Пузаков Н.А. Расчет толщины дорожной одежды по условиям морозоустойчивости (теплоустойчивости) // Материалы Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по прочности дорожных одежд. Харьков, 1968. С. 93–100.
 6. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей // Вестник СибАДИ. 2017. № 1 (53). С. 103–110.
 7. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Чурилин В.С. Моделирование напряжений и деформаций дорожных покрытий // Дороги и мосты. 2016. № 2 (36). С. 139–153. EDN: XQSGPB
 8. Попов А.М. Выбор статистически устойчивой процедуры исключения выбросов // Технические науки – от теории к практике. 2016. № 2 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-statisticheski-ustoychivoy-protsedury-isklyucheniya-vybrosov> (дата обращения: 15.01.2026).
 9. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences. New York : Wiley, 1964. 534 p.
 10. Кирюхин Г.Н. Температурные режимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2013. № 30. С. 309–328.
 11. Robertson W.D. Using the SHRP Specification to Select Asphalt Binders for Low Temperature Service // Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association. № 40. 1995. P. 170–195.
 12. Чурилин В.С. Обоснование величины допускаемого пучения грунта для проектирования морозоустойчивых нежестких дорожных одежд (на примере районов Западной Сибири) : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чурилин Владимир Сергеевич. Новосибирск : СГУПС, 2019. 165 с.
 13. Архивы погоды: Россия // Погода и климат : [сайт]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru> (дата обращения: 09.01.2026).
 14. Кочеева Н.А., Шанкибаева М.Х. Особенности изменения температуры воздуха на границе гор Алтая и равнин Западной Сибири // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2018. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-izmeneniya-temperatury-vozduha-na-granitse-gor-altaya-i-ravnin-zapadnoy-sibiri> (дата обращения: 15.01.2026).

REFERENCES

1. Blyakharchuk T.A., Bobrova A.I., Zhilina T.N. Climatic Conditions in the Southeast of Western Siberia and the Development of the Prikety Ethnocultures. *Vestnik arkheologii i etnografii*. 2021; 4 (55): 36–48. DOI: 10.20874/2071-0437-2021-55-4-3. EDN: XLBNKQ (In Russian)
2. Efimenko V.N. “Water-thermal regime of road subgrade during deep soil freezing (based on the example of South-Eastern Western Siberia)”. PhD Thesis. Moscow, 1978. 216 p. (In Russian)
3. Shesler A.I. “Uneven deformation of flexible road pavements under the influence of frost heaving, soil settlement”. PhD Thesis. Moscow: MADI, 1968 181 p. (In Russian)
4. Shorin V.A., Kagan G.L., Rakhimova I.A. Comparison of Calculation Results of Frost Resistance of Road Structures According to Standard and Proposed Methods. *Dorogi i mosty*. 2015; (4): 76–86. (In Russian)
5. Puzakov N.A. Pavement Cost According to Frost (Heat) Resistance. In: *Proc. All-Union Sci. Conf. on Pavement Durability*. Kharkov, 1968. Pp. 93–100. (In Russian)
6. Lunyov A.A., Ivanov E.V. Deformation Characteristics of Slag Mixtures. *Vestnik SibADI*. 2017; 1 (53): 103–110. (In Russian)
7. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Churilin V.S. Stress-Strain Modeling of Road Pavements. *Dorogi i mosty*. 2016; 2 (36): 139–153. EDN: XQSGPB (In Russian)

8. Popov A.M. Choosing a Statistically Robust Outlier Exclusion Procedure. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*. 2016; 2 (50). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-statistich-eski-ustoychivoy-protsedury-isklyucheniya-vybrosov> (accessed January 15, 2026). (In Russian)
9. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences. New York: Wiley, 1964. 534 p.
10. Kiryukhin G.N. Temperature Modes of Operation of Asphalt Concrete Pavements of Motor Roads. *Dorogi i mosty*. 2013; 30: 309–328. (In Russian)
11. Robertson W.D. Using the SHRP Specification to Select Asphalt Binders for Low Temperature Service. *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*. 1995; 40: 170–195.
12. Churilin V.S. “Soil thawing in design of frost-resistant non-rigid road surfaces (the Western Siberia case study)”. PhD Thesis. Novosibirsk, 2019. 165 p. (In Russian)
13. Arkhivy pogody: Rossiya. Available: www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru (accessed January 15, 2026). (In Russian)
14. Kocheeva N.A., Shankibaeva M.Kh. Air Temperature Changes at the Border of the Altai Mountains and the Plains of Western Siberia. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*. 2018; (4). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-izmeneniya-temperatury-vozduha-na-granitse-gor-altaya-i-ravnin-zapadnoy-sibiri> (accessed January 15, 2026). (In Russian)

Сведения об авторах

Сиволоп Виталий Евгеньевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vesivolap@mail.ru

Ефименко Сергей Владимирович, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, svefimenko_80@mail.ru

Ефименко Владимир Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, svefimenko_80@mail.ru

Чурилин Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lex-16-2008@mail.ru

Сухоруков Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, av_suhar@mail.ru

Галютдинов Заур Рашидович, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, z.galyautdinov@tsuab.ru

Башарин Александр Дмитриевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, basharin.2001@inbox.ru

Authors Details

Vitaliy E. Sivolap, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vesivolap@mail.ru

Sergey V. Efimenko, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, svefimenko_80@mail.ru

Vladimir N. Efimenko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, svefimenko_80@mail.ru

Vladimir S. Churilin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lex-16-2008@mail.ru

Aleksey V. Sukhorukov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, av_suhar@mail.ru

Zaur R. Galyautdinov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, z.galyautdinov@tsuab.ru

Aleksandr D. Basharin, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, basharin.2001@inbox.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 28.01.2026
Одобрена после рецензирования 30.01.2026
Принята к публикации 02.02.2026

Submitted for publication 28.01.2026
Approved after review 30.01.2026
Accepted for publication 02.02.2026

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 271–287.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 271–287.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.344.56

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-271-287

EDN: TTNFFE

КОНЦЕПЦИЯ НЕСИНХРОННОГО МНОГОТОЧЕЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК ЭКВИВАЛЕНТА ПРИХОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЭЛЕЕВСКОЙ ВОЛНЫ

Сергей Гургенович Саиян

Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,

г. Москва, Россия

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского

Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Поверхностные волны Рэлея играют значительную роль в сейсмическом воздействии на протяженные и высотные сооружения, вызывая существенные инерционные эффекты и внутренние усилия. Однако современные подходы к моделированию сейсмостойкости зданий часто не учитывают волновую природу распространения поверхностных волн, что может приводить к недооценке динамического отклика конструкций. Актуальным является разработка инженерных методов, позволяющих корректно воспроизводить пространственно-временную структуру поля рэлеевских волн в расчетных моделях.

Цель. Разработать и теоретически обосновать концепцию замены поля перемещений приходящей поверхностной рэлеевской волны эквивалентным несинхронным многоточечным (многоопорным) кинематическим воздействием на опоры здания. Цель включает формализацию постановки задачи, вывод управляющих параметров и создание алгоритма для практической реализации в стандартных программных комплексах.

Материалы и методы. В основе исследования лежит решение уравнений Навье для линейно-упругого изотропного полупространства. Используется свойство чистого временного сдвига поля рэлеевской волны на свободной поверхности. Вводится безразмерный параметр несинхронности, связывающий геометрические характеристики здания, фазовую скорость волны и направление ее прихода. Для оценки границ применимости

подхода проводится анализ погрешности плосковолнового приближения и влияния кривизны волнового фронта.

Результаты. Предложена и строго обоснована инженерная постановка, позволяющая заменить непрерывное поле поверхностной волны Рэлея набором кинематических воздействий на опоры сооружения с детерминированными временными сдвигами. Ключевым результатом является введение параметра несинхронности, который служит критерием для различения синхронного и существенно несинхронного воздействия. Получена верхняя оценка влияния кривизны волнового фронта, определяющая границы применимости эквивалентной замены. Разработанный подход обеспечивает корректный учет направления прихода волны и габаритов здания, а также вычислительную эффективность за счет генерации воздействий на все опоры на основе одной базовой записи.

Ключевые слова: поверхностные волны, сейсмические волны, волна Рэлея, многоточечное сейсмическое воздействие, несинхронность сейсмических волн

Финансирование: работа выполнена за счет гранта РФФИ № 24-49-02002.

Для цитирования: Саиян С.Г. Концепция несинхронного многоточечного сейсмического воздействия как эквивалента приходящей поверхностной рэлеевской волны // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 271–287. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-271-287. EDN: TTNFFE

ORIGINAL ARTICLE

CONCEPT OF ASYNCHRONOUS MULTI-POINT SEISMIC EXCITATION AS AN EQUIVALENT OF INCIDENT SURFACE RAYLEIGH WAVE

Sergey G. Saiyan

*The National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia*

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics

of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Rayleigh surface waves play a significant role in the seismic impact on extended and high-rise buildings, inducing substantial inertial effects and internal forces. However, modern approaches to modeling the seismic performance of buildings often neglect the wave nature of the surface-wave propagation, which may lead to underestimation of the dynamic response of structures. Therefore, it is relevant to develop engineering methods that can correctly reproduce the spatiotemporal structure of the Rayleigh-wave field in computational models.

Purpose: The aim is to develop and theoretically substantiate the concept of replacing the displacement field of incoming Rayleigh surface wave with an equivalent asynchronous multipoint (multi-support) kinematic excitation applied to the building supports. Measurement of the main parameters and design of algorithm for practical implementation in standard software.

Methodology: The study is based on solving Navier equations for a linear-elastic isotropic half-space. The pure temporal-shift property of the Rayleigh-wave field is utilized for the free surface. A dimensionless asynchrony parameter is introduced, relating the building geometry, the wave phase velocity, and the direction of the wave incidence. The applicability of this approach is evaluated as well as the error of the plane-wave approximation, and the influence of wavefront curvature are analyzed.

Research findings: An engineering formulation is proposed and rigorously justified that allows to replace the continuous Rayleigh surface-wave field by a set of kinematic excitations at the building supports with deterministic time shifts. The key result is the introduction of the asynchrony parameter, which serves as a criterion for distinguishing between the synchronous

and substantially asynchronous excitation. An upper bound for the influence of wavefront curvature is obtained, defining the applicability limits of the equivalent replacement.

Practical implication: The developed approach provides a correct account for the wave incidence direction and building dimensions, as well as the computational efficiency by generating excitations at all supports from a single baseline record.

Keywords: surface wave, seismic wave, Rayleigh wave, multi-point seismic excitation, wave asynchrony

Funding: This work was supported by Grant No. 24-49-02002 from the Russian Science Foundation.

For citation: Saiyan S.G. Concept of Asynchronous Multi-Point Seismic Excitation as an Equivalent of Incident Surface Rayleigh Wave. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 271–287. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-271-287. EDN: TTNFFE

Введение

Городская застройка стремительно растет в высоту и протяженность [1], а уязвимость протяженных и конструктивно сложных сооружений для поверхностных сейсмических волн все чаще подтверждается наблюдениями и математическими моделями. Поверхностные волны Рэлея способны формировать длительные, энергоемкие колебания с выраженной эллиптической поляризацией частиц у свободной поверхности, что приводит к существенным инерционным эффектам и, как следствие, значимым внутренним усилиям.

Недавний анализ записей землетрясений, в том числе события Пуэбла-Морелос (Puebla-Morelos) [2], показывает, что вклад рэлеевских волн может приводить к медианным пиковым деформациям зданий, что делает их ключевым объектом моделирования и проектирования сейсмозащиты. В исследовании «Observations of Rayleigh waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla-Morelos, Mexico earthquake» [3] для того же землетрясения в Мексике было установлено, что вклад рэлеевских волн был особенно заметен в диапазоне частот от 0,2 до 0,9 Гц, что согласуется с диапазонами частот, описанными в литературе отечественных и зарубежных авторов [4, 5]. В работе «Comparative analysis of Rayleigh and Love waves detected propagating in the Nobi and Kanto basins during the 2004-, 2007-Chuetsu and 2011 Tohoku earthquakes» [6] были обнаружены поверхностные волны Рэлея и Лява в бассейнах рек Ноби (Nobi) и Канто (Kanto) во время землетрясений в Чуэцу (Chuetsu) в 2004 г., в 2007 г. и в Тохоку (Tohoku) в 2011 г., которые представляли собой интенсивные низкочастотные движения грунта, генерирующиеся локально по мере того, как сейсмическая энергия проходит через осадочные отложения. Анализ землетрясения в Турции, проведенный отечественными авторами [7], показал, что по записям поверхностных волн можно рассчитать их очаговые параметры в приближении мгновенного точечного источника.

За последние годы теория описания и моделирования поверхностных волн Рэлея получила значительное развитие. Основные направления исследований включают распространение рэлеевских волн в метаматериалах [8–10], многослойных (стратифицированных) средах [11–13], функционально-гради-

ентных материалах [14–16], а также применение этих волн в задачах неразрушающего контроля [17].

Что касается расчетных исследований воздействия поверхностных сейсмических волн, основное внимание уделяется следующим типам объектов: мостовым сооружениям [18, 19], высотным зданиям [20, 21], а также подземным и заглубленным конструкциям [22, 23]. Эти работы подтверждают важность учета поверхностных волн при проектировании. Для защиты от них применяются метаматериальные и барьерные концепции, направленные прежде всего на подавление волн Рэлея в низкочастотном диапазоне с целью защиты зданий, сооружений и инфраструктурных объектов.

Параллельно активно развивается направление учета пространственно-изменяющегося сейсмического воздействия [18] и многоточечного (многоопорного) возбуждения конструкций [24–26]. Для мостов и протяженных сооружений показано, что игнорирование несинхронности приводит к систематическому недоучету усилий и перемещений [27–30]. Международные и европейские нормы уточняют требования к учету волнового фронта, некогерентности и локальных эффектов, вызванных грунтовыми условиями [30]. Обновленные положения по несинхронному воздействию для мостов детально проанализированы и сопоставлены с практикой проектирования [31].

В современной отечественной и международной литературе по взаимодействию систем «грунт – здание» (Soil-Structure Interaction, SSI) за последнее десятилетие сформированы инженерные подходы и руководства к моделированию подобных систем [32–43]. Они показывают, что SSI определяющим образом влияет на период колебаний, эффективное демпфирование, распределение усилий и критерии предельных состояний [32]. Реализация задачи достигается либо прямым связанным моделированием грунта, фундамента и надземных конструкций, либо субмоделированием с частотно-зависимыми опорными податливостями и демпфированием. Систематизированные рекомендации для зданий приведены в руководствах NIST GCR 12-917-21 [32], FEMA P-2091, EN 1998-1/-2 и ASCE/SEI 7-22, тогда как обзорные публикации 2020–2025 гг. подчеркивают значимость учета нелинейных эффектов и валидации полученных результатов на натурных данных [40–43]. В стандарте ASCE/SEI 7-22 закреплены условия и ограничения SSI-подходов при расчете по спектральным и прямым динамическим подходам, а в Eurocode 8, Part 2, для мостов прямо регламентируется учет пространственной вариации движения основания и многоопорного (многоточечного) воздействия.

Важной составляющей сейсмического воздействия является пространственная изменчивость. Под ней понимаются три взаимосвязанных эффекта [44]: (i) конечная скорость распространения волнового фронта, которая вызывает детерминированные фазовые сдвиги между опорами; (ii) частотно-зависимое убывание когерентности откликов в разных точках площадки строительства из-за различий в грунтовых условиях; (iii) эффект некогерентности, возникающий из-за рассеяния волн в неоднородной среде земли. Для инженерных расчетов это удобно описывать через функцию когерентности $\gamma(\omega, \mathbf{r})$ и матрицу кросс-спектральной плотности в точках i и j в виде $S_{ij}(\omega) = \sqrt{S_i(\omega)S_j(\omega)}\gamma(\omega, r_{ij})$. Типовые модели γ в практике включают экспо-

ненциальную форму с калибровкой параметров по данным площадки [45]. Влияние пространственной изменчивости на усилия в протяженных сооружениях показано в работах [27–31]. Обзор моделей и методика инженерного учета приведены в ряде работ [45–47], нормативные указания содержатся в EN 1998-1/-2 и ASCE/SEI 7-22.

Ситуация с текущими международными и отечественными работами двоякая. С одной стороны, многоточечные (многоопорные) постановки в последние пять лет активно развиваются для мостов, тоннелей и линейных (протяженных) объектов, что подтверждает актуальность и степень разработанности данной темы [24–28]. С другой стороны, научные исследования, нормы и программные средства пока не предлагают унифицированного подхода для воспроизведения именно поверхностной сейсмической волны как набора опорных кинематических воздействий в виде несинхронных бегущих волн, согласованных по фазе в плане здания. Настоящая работа закрывает этот разрыв.

Таким образом, формулируется цель данного исследования – разработать и строго обосновать инженерную постановку, в которой поверхностная рэлеевская волна заменяется эквивалентным несинхронным многоточечным (многоопорным) кинематическим воздействием; вывести связанный набор уравнений движения и параметров управления несинхронностью, а также сформулировать алгоритм задания такого воздействия в стандартных программных комплексах, наиболее распространенных в строительной отрасли (ANSYS Mechanical APDL, ABAQUS, ANSYS LS-DYNA, NASTRAN, Лира-САПР, SCAD Office, Лира-Софт, СтаДиКон и т. д.), для прямого динамического анализа.

Постановка задачи, гипотезы и управляющие параметры

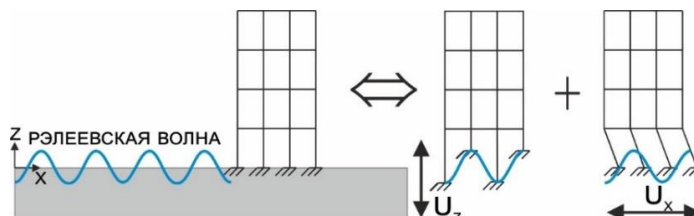
В рамках линейно-упругой континуальной модели основания рассматривается здание, опирающееся на поверхность однородного изотропного линейно-упругого полупространства. На поверхности основания распространяется рэлеевская волна, приходящая под углом θ к оси X . Пусть c_R – скорость рэлеевской волны, $\lambda_R = 2\pi c_R / \omega$ – длина волны для круговой частоты ω . Геометрия основания здания аппроксимируется многоопорной (многоточечной) схемой, при которой опоры (узлы контакта с грунтом) имеют координаты $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, 0)$, где $i = 1, 2, \dots, n_b$ (количество опор).

Ключевая идея данной работы – заменить непрерывное поле перемещений рэлеевской волны на поверхности эквивалентным несинхронным (многоопорным или многоточечным) кинематическим воздействием (рисунок), при котором на каждой опоре задается своя временная история перемещений/скоростей/ускорений с детерминированным фазовым сдвигом из-за конечной скорости распространения волн по поверхности.

Введем управляющий безразмерный параметр несинхронности, определяющий режим возбуждения, записанный в разных формах (терминах):

$$\kappa(\omega, \theta) = \frac{L_{\omega\phi}(\theta)}{\lambda_R} = \frac{\omega L_{\omega\phi}(\theta)}{2\pi c_R} = \frac{\Delta t_{\max}(\theta)}{T}, \quad (1)$$

где $L_{\text{эф}}(\theta) = L_x |\cos(\theta)| + L_y |\sin(\theta)|$; L_x и L_y – габариты здания по осям плана, $T = 2\pi/\omega$; $\Delta t_{\text{max}} = L_{\text{эф}}(\theta)/c_R$ – максимальный сдвиг по времени между крайними опорами по направлению прихода поверхностной волны. Подстановка $\theta = 0^\circ$ дает $L_{\text{эф}} = L_x$, $\theta = 90^\circ$ дает $L_{\text{эф}} = L_y$, в то время как промежуточные величины угла θ дают плавное изменение между этими предельными значениями.



Эквивалентная замена рэлеевской волны на несинхронное многоточечное возбуждение опор зданий

Equivalent replacement of relay wave with asynchronous multipoint excitation of building supports

При $\kappa \ll 1$ воздействие близко к синхронному, а при $\kappa = O(1)$ и выше несинхронность существенна. Существенная несинхронность возникает, когда временной сдвиг сравним с доминирующим периодом отклика (обычно T_1).

Представление рэлеевской волны у свободной поверхности как бегущей волны

В линейно-упругом изотропном полупространстве ($z \leq 0$) справедливы уравнения Навье:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad}(\text{div}(\mathbf{u})), \quad (2)$$

где ρ – плотность; $\mathbf{u}$ – вектор перемещений; λ и μ – константы Ламе; Δ – оператор Лапласа. С граничным условием свободной поверхности на $z = 0$, при котором возникают нулевые поверхностные напряжения $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0$.

Ищем решение для поверхностной волны, бегущей в горизонтальном направлении $\mathbf{s} = (\cos(\theta), \sin(\theta), 0)$:

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ \left[\mathbf{A} e^{\gamma_s k z} + \mathbf{B} e^{\gamma_p k z} \right] e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \right\}, \quad (3)$$

где $k = \omega/c_R$; $\gamma_p = \sqrt{1 - (c_R/c_p)^2}$ и $\gamma_s = \sqrt{1 - (c_R/c_s)^2}$ – безразмерные затухающие по глубине показатели; $c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ и $c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ – скорости распространения продольных (p) и поперечных (s) волн.

Граничные условия на $z = 0$ приводят к уравнениям для фазовой скорости волны Рэлея [48]:

$$\left(\frac{c_R}{c_s}\right)^6 - 8\left(\frac{c_R}{c_s}\right)^4 + 8\left(3 - 2\frac{c_s^2}{c_p^2}\right)\left(\frac{c_R}{c_s}\right)^2 - 16\left(1 - \frac{c_s^2}{c_p^2}\right) = 0, \quad (4)$$

где вещественный корень $0 < \frac{c_R}{c_s} < 1$ определяет c_R . Для однородного полупространства c_R практически отсутствует дисперсия, что позволяет работать с фиксированной скоростью c_R , независимой от ω . Для практических целей возможно использование аппроксимации через коэффициент Пуассона [49]:

$$c_R \approx c_s \frac{0,862 + 1,14\nu}{1 + \nu}. \quad (5)$$

Свойство сдвига по времени на свободной поверхности

На свободной поверхности $z = 0$:

$$\mathbf{u}_S(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\left\{\mathbf{U}_0 e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)}\right\}, \quad (6)$$

где $\mathbf{U}_0 = (U_x \mathbf{s} + U_z \mathbf{e}_z)$ – комплексная амплитуда с эллиптической поляризацией (горизонтальная вдоль $\mathbf{s}$, вертикальная U_z), $\mathbf{e}_z$ – единичный вектор вдоль оси z . Отношение $|U_x|/|U_z|$ зависит только от соотношения c_s/c_p . Для двух точек $\mathbf{r}_i$ и $\mathbf{r}_j$ на поверхности:

$$\mathbf{u}_S(\mathbf{r}_i, t) = \mathbf{u}_S\left(\mathbf{r}_j, t - \frac{\mathbf{s}(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{c_R}\right). \quad (7)$$

Поле на поверхности представляет собой бегущую волну, а значение в любых двух точках отличается чистым сдвигом по времени без изменения амплитуды (в пределах плоской волны), что подтверждает возможность данной постановки задачи.

Кинематическое задание на опорах (многоточечное воздействие)

Пусть базовая запись вдоль направления распространения – скалярная временная функция $u_x^0(t)$ – перемещение, а $\dot{u}_x^0(t)$ и $\ddot{u}_x^0(t)$ – ее производные (скорость и ускорение соответственно). Вертикальная составляющая $u_z^0(t)$ связана соотношением эллиптической поляризации. Для опоры с координатами $\mathbf{r}_i$ вводим временной сдвиг:

$$\Delta t_i = \frac{x_i \cos(\theta) + y_i \sin(\theta)}{c_R} = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}_i}{c_R}. \quad (8)$$

Тогда абсолютные перемещения, скорости и ускорения основания в опоре i равны:

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}_b^{(i)}(t) &= u_x^0(t - \Delta t_i) \mathbf{s} + u_z^0(t - \Delta t_i) \mathbf{e}_z; \\
\dot{\mathbf{u}}_b^{(i)}(t) &= \dot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \mathbf{s} + \dot{u}_z^0(t - \Delta t_i) \mathbf{e}_z; \\
\ddot{\mathbf{u}}_b^{(i)}(t) &= \ddot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \mathbf{s} + \ddot{u}_z^0(t - \Delta t_i) \mathbf{e}_z.
\end{aligned} \tag{9}$$

В глобальных осях X, Y, Z горизонтальная часть автоматически раскладывается на

$$\begin{aligned}
a_{X_i} &= \ddot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \cos(\theta); \\
a_{Y_i} &= \ddot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \sin(\theta); \\
a_{Z_i} &= \ddot{u}_z^0(t - \Delta t_i).
\end{aligned} \tag{10}$$

Для одной компоненты запись формируется в следующем виде:

$$a_i(t) = a_0(t - \Delta t_i). \tag{11}$$

Данная запись может использоваться для задания любой компоненты как независимой компоненты (горизонтальной или вертикальной) в виде многоготочного воздействия, воспроизводя бегущую волну по опорам зданий и сооружений.

Для учета пространственной изменчивости к детерминированному сдвигу Δt_i можно добавить некогерентность между опорными воздействиями. Для этого можно рассмотреть два практических варианта.

1. *Спектральный синтез*, при котором формируется целевая матрица когерентности $\Gamma_{ij}(\omega) = \gamma(\omega, r_{ij})$, после чего генерируются согласованные процессы с кросс-спектральной матрицей $\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \mathbf{S}_0(\omega) \mathbf{H}^H(\omega)$, где $\mathbf{H}$ выбирают по разложению Холецкого для Γ [50, 51].

2. *Временной синтез*, при котором запись $a_0(t)$ для опоры-эталона модифицируется сверткой $a_i(t) = a_0(t - \Delta t_i) h_i(t)$ так, чтобы взаимные функции корреляции воспроизводили заданную $\gamma(\omega, r_{ij})$.

Уравнения движения сооружения при заданных перемещениях опор

Пусть $\mathbf{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ – абсолютные узловые перемещения модели (все степени свободы), матрицы M, C, K – массы, демпфирования и жесткости соответственно. Обозначим двоичную матрицу (0 и 1) опорных степеней свободы $E_b \in \mathbb{R}^{n \times n_b}$ и вектор опорных перемещений $\mathbf{u}_b(t) \in \mathbb{R}^{n_b}$, составленный из компонент $\mathbf{u}_b^{(i)}$. Введем разложение

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{v}(t) + E_b \mathbf{u}_b(t), \tag{12}$$

где $\mathbf{v}(t)$ – неизвестные относительные перемещения (нулевые на опорах). Подстановка в уравнения движения $M\ddot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} = 0$ дает

$$M\ddot{\mathbf{v}} + C\dot{\mathbf{v}} + K\mathbf{v} = -(ME_b\ddot{\mathbf{u}}_b + CE_b\dot{\mathbf{u}}_b + KE_b\mathbf{u}_b). \quad (13)$$

Это обобщенная форма для любой комбинации несинхронных многоточечных опорных перемещений. Если программный комплекс позволяет задавать граничные перемещения непосредственно (условия Дирихле на опорах), то численно решается (13) без явного формирования правой части – через кинематические связи.

Выбор базовой формы записи и связь между горизонтальной и вертикальной компонентами рэлеевской волны

Для строгой эквивалентности используется одна и та же базовая форма записи в горизонтальном направлении распространения и вертикали, но с амплитудным отношением из эллиптической поляризации. В рамках полупространства отношение модулей амплитуд на поверхности есть функция $\xi = (c_s/c_p)^2$:

$$\frac{|U_z|}{|U_x|} = \chi(\xi), \quad \varphi = \arg\left(\frac{U_z}{U_x}\right), \quad (14)$$

где отношение χ и фазовый сдвиг φ определяют из решения краевых условий. Для большинства грунтовых массивов можно принять значение в диапазоне $1,2|U_x| \lesssim |U_z| \lesssim 1,6|U_x|$ и $\varphi \approx \pi/2$ [52–54]. В некотором инженерном приближении можно рассмотреть

$$u_z^0(t) \approx \eta u_x^0(t + \tau), \quad (15)$$

где $\eta \in [1, 2; 1, 6]$, $\tau \approx T/4$. Данное приближение воспроизводит эллиптическую траекторию частиц в вертикальной плоскости распространения. Уточнение η , τ делается по заданным c_p и c_s или по локальной дисперсионной кривой [55].

Оценка погрешности плосковолнового приближения

Пусть сейсмическая волна приходит со стороны единичного вектора $\mathbf{s} = (\cos(\theta), \sin(\theta), 0)$ и имеет радиус кривизны фронта R в окрестности здания (источник расположен на расстоянии R по направлению $\mathbf{s}$). Длина пути от центра кривизны до точки $\mathbf{r}$ равна $d(\mathbf{r}) = \|\mathbf{R}\mathbf{s} - \mathbf{r}\|$. Фаза гармонического поля с круговой частотой ω и волновым числом $k = \omega/c_R$ пропорциональна пути $\varphi(\mathbf{r}) = k d(\mathbf{r})$ и для идеальной плоской волны $\varphi_{pl}(\mathbf{r}) = k(R - \mathbf{s} \cdot \mathbf{r})$.

Проведем разложение точной фазы при $R \gg L_{эф}$. Вычислим $d(\mathbf{r})$ с точностью до порядка $1/R$, положив $\varepsilon = -2 \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}}{R} + \frac{\|\mathbf{r}\|^2}{R^2}$. Для малых $|\varepsilon|$ используем биномиальное разложение $\sqrt{1 + \varepsilon} \approx 1 + \frac{1}{2}\varepsilon - \frac{1}{8}\varepsilon^2$. Итоговое выражение для $d(\mathbf{r})$ выглядит следующим образом:

$$d(\mathbf{r}) \approx R \left(1 - \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}}{R} + \frac{1}{2} \frac{\|\mathbf{r}\|^2}{R^2} - \frac{1}{2} \frac{(\mathbf{s} \cdot \mathbf{r})^2}{R^2} \right) = R - \mathbf{s} \cdot \mathbf{r} + \frac{1}{2R} (\|\mathbf{r}\|^2 - (\mathbf{s} \cdot \mathbf{r})^2). \quad (16)$$

Заметим, что $\|\mathbf{r}\|^2 - (\mathbf{s} \cdot \mathbf{r})^2 = \|\mathbf{r}_\perp\|^2 = r_\perp^2$, где $\mathbf{r}_\perp$ – проекция точки на направление, перпендикулярное приходу волны (поперечное расстояние до оси пространства). Значит, $d(\mathbf{r}) \approx R - \mathbf{s} \cdot \mathbf{r} + \frac{r_\perp^2}{2R}$.

Точная фаза плоской волны отличается на $\delta\varphi(\mathbf{r}) = \varphi(\mathbf{r}) - \varphi_{pl}(\mathbf{r}) = k \frac{r_\perp^2}{2R}$. Это добавка в фазе, возникающая из-за кривизны фронта волны. Она квадратична к поперечному расстоянию $r_\perp$, что приводит к тому, что точки, лежащие дальше от оси фронта волны, отстают/опережают по фазе чуть сильнее.

Фаза и время связаны через $\varphi = \omega t$. Малое добавление фазы эквивалентно временному сдвигу:

$$\delta t(\mathbf{r}) = \frac{\delta\varphi(\mathbf{r})}{\omega} = \frac{k r_\perp^2}{2R\omega} = \frac{r_\perp^2}{2Rc_R}. \quad (17)$$

Формула (17) показывает, насколько многоточечная модель (с чистым линейным сдвигом по $\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}$) может сдвинуться по времени из-за неплоского волнового фронта.

Для любой точки здания $r_\perp \leq \frac{L_\perp(\theta)}{2}$, где $L_\perp(\theta) = L_x |\sin(\theta)| + L_y |\cos(\theta)|$.

Подставляя в формулу для δt , получим верхнюю оценку

$$\delta t \lesssim \frac{L_\perp^2(\theta)}{8Rc_R}, \quad (18)$$

что указывает на влияние кривизны на поперечный размер здания. Отсюда формулируется критерий малости кривизны $\frac{\delta t}{T} \ll 1$, при котором $L_\perp^2 \ll 8R\lambda_R$. Эта оценка задает границу применимости эквивалентной замены.

Заключение

В работе была предложена концепция несинхронного многоточечного сейсмического воздействия как эквивалента приходящей поверхностной рэлеевской волны. На основе проведенного исследования можно сформулировать конкретные выводы.

1. В работе предложена и обоснована инженерная постановка, в которой поле перемещений поверхностной рэлеевской волны у свободной поверхности заменяется эквивалентным несинхронным многоточечным (многоопорным) кинематическим воздействием на опоры здания. Ключевая идея данной работы заключается в том, чтобы представить зарегистрированную или синтезированную временную историю в одной опорной точке как базовую запись и воспро-

известии приход бегущей волны посредством детерминированных сдвигов по времени, зависящих от направления фронта, фазовой скорости c_R и геометрии сооружения в плане. Эта эквивалентность доказана через представление решения уравнений Навье для полупространства и свойство «чистого» временного сдвига поля Рэлея при $z = 0$ между любыми двумя точками поверхности.

2. Центральным результатом является введение безразмерного параметра несинхронности $\kappa(\omega, \theta) = \frac{L_{\text{эф}}(\theta)}{\lambda_R} = \frac{\omega L_{\text{эф}}(\theta)}{2\pi c_R} = \frac{\Delta t_{\text{max}}(\theta)}{T}$, который связывает

длину здания по направлению волнового фронта, ее скорость и частоту возбуждения. Было показано, что в пределе при $\kappa \ll 1$ воздействие близко к синхронному, а при $\kappa = O(1)$ и выше несинхронность существенна, что указывает на доминирующую роль пространственно-временной несогласованности кинематических опорных воздействий. Такой параметр выступает удобным критерием применимости классических моделей и одновременно индикатором необходимости задания многоточечного воздействия для поверхностных сейсмических волн.

3. Проведена оценка ошибки плосковолнового приближения и показано, что влияние кривизны фронта можно ограничить сверху через дополнительный временной сдвиг $\delta t \lesssim \frac{L_{\perp}^2(\theta)}{8Rc_R}$. Отсюда вытекает критерий малости кривизны

$\frac{\delta t}{T} \ll 1$, при котором $L_{\perp}^2 \ll 8R\lambda_R$. Эта оценка задает границу применимости эквивалентной замены.

4. С инженерной точки зрения предложенная концепция дает три прямых следствия. Во-первых, она позволяет корректно учесть влияние угла прихода фронта волны θ и габаритов здания в плане, что важно для оценки неблагоприятных направлений воздействия. Во-вторых, она естественным образом объединяет расчеты зданий и сооружений с уже устоявшейся практикой расчетов мостовых конструкций по многоопорным представлениям, но уточняет именно «волновую» природу фазовой связи между опорами для поверхностных волн (а не произвольную некогерентность). В-третьих, она обеспечивает воспроизводимый и не затратный по вычислительным ресурсам подход к моделированию, при котором кинематические воздействия для одной опоры $a_0(t)$ формируют возбуждения на других опорах по направлению распространения волны как $a_i(t) = a_0(t - \Delta t_i)$ с вычислением временного сдвига $\Delta t_i = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}_i}{c_R}$.

Данная работа будет продолжена в виде расчетных численных исследований влияния параметров поверхностного сейсмического воздействия на динамический отклик зданий различных конфигураций (протяженные и высотные). Планируется сформировать набор расчетных сценариев с вариацией волновых характеристик ($c_R(\omega)$, θ , амплитудно-частотного состава и эллиптической поляризации), безразмерного параметра несинхронности $\kappa(\omega, \theta)$, габаритных соот-

ношений зданий (протяженности и высоты) в постановке многоточечного сейсмического воздействия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Щукина М.Н. Современное высотное строительство. Москва: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. 440 с.
2. Ruiz-Garcia J., Miranda E. Influence of Surface Rayleigh Waves on the Seismic Response of RC Buildings with Weak First-Story During the 2017 MW7. 1 Puebla–Morelos Earthquake in Mexico City // Journal of Earthquake and Tsunami. 2025. V. 19. № 3. P. 2450041. DOI: 10.1142/S1793431124500416
3. Heresi P., Ruiz-García J., Payán-Serrano O., Miranda E. Observations of Rayleigh waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla–Morelos, Mexico earthquake // Earthquake Spectra. 2020. V. 36. № 2. P. 62–82. DOI: 10.1177/8755293020942
4. Brissaud Q., Bowden D.C., Tsai V.C. Extension of the basin Rayleigh-wave amplification theory to include basin-edge effects // Bulletin of the Seismological Society of America. 2020. V. 110. № 3. P. 1305–1322. DOI: 10.1785/0120190161
5. Лебедев А.В., Манаков С.А. Точность оценки параметров слоистой среды при использовании когерентного векторного приема поверхностной волны Рэлея // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 1. С. 68–82.
6. Meza-Fajardo K.C., Aochi H., Papageorgiou A.S. Comparative analysis of Rayleigh and Love waves detected propagating in the Nobi and Kanto basins during the 2004-, 2007-Chuetsu and 2011 Tohoku earthquakes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2021. V. 143. P. 106606. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106606
7. Филиппова А.И., Фомочкина А.С. Очаговые параметры сильных турецких землетрясений 06.02.2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,7$) по данным поверхностных волн // Физика земли. 2023. № 6. С. 89–102.
8. Wu X., Wen Z., Jin Y., Rabczuk T., Zhuang X., Djafari-Rouhani B. Broadband Rayleigh wave attenuation by gradient metamaterials // International Journal of Mechanical Sciences. 2021. V. 205. P. 106592. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106592
9. Palermo A., Yousefzadeh B., Daraio C., Marzani A. Rayleigh wave propagation in nonlinear metasurfaces // Journal of Sound and Vibration. 2022. V. 520. P. 116599. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116599
10. Zhou L., Wan S. Rayleigh waves isolation based on metamaterials surface // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2023. V. 30. № 21. P. 4361–4371. DOI: 10.1080/15376494.2022.2092800
11. Kuznetsov S.V. Guided waves in stratified media: Observing multiple Sezawa modes // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2023. V. 30. № 2. P. 382–387. DOI: 10.1080/15376494.2021.2014607
12. Bhat M., Manna S., Alkinidri M. Rayleigh wave fields in a multilayered micropolar media // International Journal of Geomechanics. 2024. V. 24. № 4. P. 04024026. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-872
13. Mubarak A.M., Helmi M.M., Nuruddeen R.I., Areshi M. Propagation of Rayleigh-type waves on an elastic half-space covered by a thin multi-layered coating // Mechanics of Solids. 2024. V. 59. № 5. P. 2906–2920. DOI: 10.1134/S0025654424604671
14. Кузнецов С.В., Саиян С.Г. Нелинейные акустические волны в гиперупругих стержнях // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2025. № 2. С. 210–225.
15. Pradhan N., Saha S., Samal S., Pramanik S. Nonlocal analysis of Rayleigh-type wave propagating in a gradient layered structure with distinct interfacial imperfections // The European Physical Journal Plus. 2024. V. 139. № 8. P. 763. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05554-9
16. Kuznetsov S.V. Harmonic acoustic waves in FG rods with exponential inhomogeneity // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. 2023. V. 74. № 2. P. 63. DOI: 10.1007/s00033-023-01955-5
17. Kumar J., Gohil R. R. Non-destructive testing of slab-like structures including pavements using Lamb and Rayleigh waves-based dispersion analysis // International Journal of Pavement Engineering. 2023. V. 24. № 1. P. 2180147. DOI: 10.1080/10298436.2023.2180147

18. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. P. 106013. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.106013
19. Perraud Y., Chatzigogos C.T., Meza-Fajardo K.C., Labbé P. Effect of Rayleigh waves on seismic response of bridge pylons via Incremental Dynamic Analyses // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022. V. 152. P. 107043. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.107043
20. Саиян С.Г., Шитикова М.В. Сравнительный анализ динамического отклика зданий и сооружений различной высоты на ветровые и сейсмические воздействия // *Строительная механика и конструкции*. 2025. Т. 1. № 44. С. 16–30.
21. Никитин И.С., Филимонов А.В., Якушев В.Л. Распространение волн Рэлея при косом ударе метеорита о поверхность Земли и их воздействие на здания и сооружения // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2013. Т. 5. № 6. С. 981–992.
22. Bao X., Liu J., Tan H., Li S., Wang F. A comparative analysis of seismic response of shallow buried underground structure under incident P, SV and Rayleigh waves // *Earthquake Research Advances*. 2022. V. 2. № 4. P. 100179. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100179
23. Alielahi H., Nadernia Z., Entezari M.M. A numerical study on effect of underground cavities on seismic ground response due to Rayleigh wave propagation // *SN Applied Sciences*. 2023. V. 5. № 2. P. 64. DOI: 10.1007/s42452-023-05283-1
24. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности // *Геология и геофизика Юга России*. 2022. Т. 12. № 1. С. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006
25. Гиман Л.Н., Уздин А.М. К вопросу расчета на сейсмические воздействия протяженных сооружений с дискретными опорами // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2002. № 2. С. 18–23.
26. Гиман Л.Н., Уздин А.М. Об одной форме представления сейсмического воздействия для оценки корреляции колебаний точек дневной поверхности при расчете многоопорных конструкций // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2006. № 2. С. 22–29.
27. Savor Novak M., Lazarevic D., Atalic J., Uros M. Influence of multiple-support excitation on seismic response of reinforced concrete arch bridges // *Applied Sciences*. 2019. V. 10. № 1. P. 17. DOI: 10.3390/app10010017
28. Уздин А.М. Особенности задания воздействия для оценки сейсмостойкости вантовых мостов больших пролетов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2008. № 4. С. 53–64.
29. Mwafy A.M., Kwon O.S., Elnashai A., Hashash Y.M. Wave passage and ground motion incoherency effects on seismic response of an extended bridge // *Journal of Bridge Engineering*. 2011. V. 16. № 3. P. 364–374. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.000015
30. Sextos A.G., Kappos A.J. Evaluation of seismic response of bridges under asynchronous excitation and comparisons with Eurocode 8-2 provisions // *Bull Earthquake Eng.* 2009. V. 7. P. 519–545. DOI: 10.1007/s10518-008-9090-5
31. Sextos A.G., Pitilakis D., Kappos A. Evaluation of the new Eurocode 8-part 2 provisions regarding asynchronous excitation of irregular bridges // 4th European workshop on the seismic behaviour of irregular and complex structures, Thessaloniki. 2012. Paper № 04.
32. Stewart J., Crouse C.B., Hutchinson T., Lizundia B., Naeim F., Ostadan F. Soil-Structure Interaction for Building Structures // *Grant/Contract Reports (NISTGCR)*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Report Number: 12-917-21. 2012. 292 p. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495 (дата обращения: 07.10.2025).
33. Мкртычев О.В., Дударева М.С. Учет совместной работы железобетонного здания с грунтом основания при интенсивном сейсмическом воздействии // *Строительство: наука и образование*. 2018. № 2. С. 28–42.
34. Мкртычев О.В., Джинчелашвили Г.А., Бусалова М.С. Моделирование взаимодействия сооружения с основанием при расчете на землетрясение // *Вестник МГСУ*. 2013. № 12. С. 34–40.
35. Мкртычев О.В., Лохова Е.М. Проектирование сейсмостойких зданий. Нормы нового поколения // *Жилищное строительство*. 2024. № 4. С. 42–46. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-4-42-46
36. Тятин А.Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. Москва : Изд-во АСВ, 2016. 399 с.

37. Пиеничкина В.А., Дроздов В.В., Строк С.И. Влияние жесткости основания на динамические характеристики здания как многомассового консольного стержня // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 4. С. 298–310.
38. Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С. Безопасность эксплуатации оснований зданий и сооружений при динамическом воздействии // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5 (104). С. 537–544.
39. Сенькин Н.А., Васильев В.С. Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 637–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654
40. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures // *Frontiers in Built Environment*. 2023. V. 9. P. 1120351. DOI: 10.3389/fbuilt.2023.1120351
41. Zhan P., Xue S., Li X., Sun G., Ma R. Seismic assessment of large-span spatial structures considering soil–structure interaction (SSI): A State-of-the-Art Review // *Buildings*. 2024. V. 14. № 4. P. 1174. DOI: 10.3390/buildings14041174
42. Ngoc Nguyen T., Ngo V.L. A review of soil–foundation–structure interaction and structure–soil–structure interaction effects based on numerical simulations // *Journal of Water and Land Development*. 2025. P. 1–12. DOI: 10.24425/jwld.2025.155295
43. Riaz M.R., Motoyama H., Hori M. Review of soil-structure interaction based on continuum mechanics theory and use of high performance computing // *Geosciences*. 2021. V. 11. № 2. P. 72. DOI: 10.3390/geosciences11020072
44. Kiureghian A.D. A coherency model for spatially varying ground motions // *Earthquake engineering & structural dynamics*. 1996. V. 25. № 1. P. 99–111. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<99::AID-EQE540>3.0.CO;2-C
45. Zerva A. Spatial variation of seismic ground motions: modeling and engineering applications. Boca Raton. Crc Press, 2016. 486 p. DOI: 10.1201/9781420009910
46. Kramer S.L., Stewart J.P. Geotechnical earthquake engineering. CRC Press, 2024. 1060 p.
47. Shi J.Y., Chen S.S., Chen K.Y. A simplified model of layered soil for analyzing vertical vibration of loaded foundations // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2022. V. 19. № 1. P. 21–38. DOI: 10.1080/15732479.2021.1919152
48. Викторov И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. Москва : Наука, 1981. 287 с.
49. Freund L.B. Dynamic fracture mechanics. Cambridge University Press, 1998. 83 p.
50. Мендрий Я.В., Тяпкин Ю.К. Развитие технологии расчета когерентности на основе усовершенствованных моделей сейсмической записи // *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34. № 3. С. 102–115.
51. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. Москва : Высшая школа, 2009. 840 с.
52. Викторov И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. Москва : Наука, 1966. 168 с.
53. Graff K.P. Wave Motion in Elastic Solids. Oxford : Clarendon, 1975. 682 p.
54. Frederick J.R. Ultrasonic Engineering. New York : Wiley, 1965. 382 p.
55. Вопросы геофизики. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2013. 177 с.

REFERENCES

1. Shchukina M.N. Modern High-Rise Construction. Moscow: Moskomarkhitektura', 2007. 440 p. (In Russian)
2. Ruiz-Garcia J., Miranda E. Influence of Surface Rayleigh Waves on the Seismic Response of RC Buildings with Weak First-Story during the 2017 MW7.1 Puebla–Morelos earthquake in Mexico City. *Journal of Earthquake and Tsunami*. 2025; 19 (3): 2450041. DOI: 10.1142/S1793431124500416
3. Heresi P., Ruiz-García J., Payán-Serrano O., Miranda E. Observations of Rayleigh Waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla–Morelos, Mexico Earthquake. *Earthquake Spectra*. 2020; 36 (2_suppl): 62–82. DOI: 10.1177/8755293020942
4. Brissaud Q., Bowden D.C., Tsai V.C. Extension of the basin Rayleigh-wave amplification theory to include basin-edge effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020; 110 (3): 1305–1322. DOI: 10.1785/0120190161

5. Lebedev A.V., Manakov S.A. Accuracy of Estimating Layered-Medium Parameters using Coherent Vector Reception of Rayleigh Surface Wave. *Akusticheskii Zhurnal*. 2022; 68 (1): 68–82. (In Russian)
6. Meza-Fajardo K.C., Aochi H., Papageorgiou A.S. Comparative Analysis of Rayleigh and Love Waves Detected Propagating in the Nobi and Kanto Basins during the 2004-, 2007-Chuetsu and 2011 Tohoku Earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021; 143: 106606. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106606
7. Filippova A.I., Fomochkina A.S. Source Parameters of Strong Turkish Earthquakes on 06.02.2023 ($M_w = 7.8$ and $M_w = 7.7$) based on surface waves. *Fizika Zemli*. 2023; (6): 89–102. DOI: 10.31857/S0002333723060078 (In Russian)
8. Wu X., Wen Z., Jin Y., Rabczuk T., Zhuang X., Djafari-Rouhani B. Broadband Rayleigh Wave Attenuation by Gradient Metamaterials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021; 205: 106592. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106592
9. Palermo A., Yousefzadeh B., Daraio C., Marzani A. Rayleigh Wave Propagation in Nonlinear Metasurfaces. *Journal of Sound and Vibration*. 2022; 520: 116599. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116599
10. Zhou L., Wan S. Rayleigh Waves Isolation based on Metamaterials Surface. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023; 30 (21): 4361–4371. DOI: 10.1080/15376494.2022.2092800
11. Kuznetsov S.V. Guided Waves in Stratified Media: Observing Multiple Sezawa Modes. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023; 30 (2): 382–387. DOI: 10.1080/15376494.2021.2014607
12. Bhat M., Manna S., Alkinidri M. Rayleigh Wave Fields in a Multilayered Micropolar Media. *International Journal of Geomechanics*. 2024; 24 (4): 04024026. DOI: 10.1061/IJGNALGMENG-872
13. Mubarak A.M., Helmi M.M., Nuruddeen R.I., Areshi M. Propagation of Rayleigh-Type Waves on an Elastic Half-Space Covered by a Thin Multi-Layered Coating. *Mechanics of Solids*. 2024; 59 (5): 2906–2920. DOI: 10.1134/S0025654424604671
14. Kuznetsov S.V., Saiyan S.G. Nonlinear Acoustic Waves in Hyperelastic Rods *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*. 2025; (2): 210–225. (In Russian)
15. Pradhan N., Saha S., Samal S., Pramanik S. Nonlocal analysis of Rayleigh-Type Wave Propagating in a Gradient Layered Structure with Distinct Interfacial Imperfections. *The European Physical Journal Plus*. 2024; 139 (8): 763. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05554-9
16. Kuznetsov S.V. Harmonic Acoustic Waves in FG Rods with Exponential Inhomogeneity. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2023; 74 (2): 63. DOI: 10.1007/s00033-023-01955-5
17. Kumar J., Gohil R.R. Non-Destructive Testing of Slab-Like Structures Including Pavements using Lamb- and Rayleigh-Waves-based Dispersion Analysis. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24 (1): 2180147. DOI: 10.1080/10298436.2023.2180147
18. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Simplified Design of Bridges for Multiple-Support Earthquake Excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020; 131: 106013. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.106013
19. Perraud Y., Chatzigogos C.T., Meza-Fajardo K.C., Labbé P. Effect of Rayleigh Waves on Seismic Response of Bridge Pylons via Incremental Dynamic Analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022; 152: 107043. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.107043
20. Saiyan S.G., Shitikova M.V. Comparative Analysis of Dynamic Response of Different-Height Building to Wind and Seismic Actions. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii*. 2025; 1 (44): 16–30. (In Russian)
21. Nikitin I.S., Filimonov A.V., Yakushev V.L. Propagation of Rayleigh Waves from an Oblique Meteorite Impact on the Earth's Surface and their Effect on Buildings. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2013; 5 (6): 981–992. (In Russian)
22. Bao X., Liu J., Tan H., Li S., Wang F. A Comparative Analysis of Seismic Response of Shallow Buried Underground Structure under Incident P, SV and Rayleigh Waves. *Earthquake Research Advances*. 2022; 2 (4): 100179. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100179
23. Alielahi H., Nadernia Z., Entezari M.M. A Numerical Study on Effect of Underground Cavities on Seismic Ground Response due to Rayleigh Wave Propagation. *SN Applied Sciences*. 2023; 5 (2): 64. DOI: 10.1007/s42452-023-05283-1
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial Heterogeneity of the Acceleration Field of the Daytime Surface. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2022; 12 (1): 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006 (In Russian)

25. Gimán L.N., Uzdin A.M. On Calculating Elongated Structures with Discrete Supports under Seismic Actions. *Seismostoi'koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2002; (2): 18–23. (In Russian)
26. Gimán L.N., Uzdin A.M. Representation of Seismic Action for Correlation Assessment of Daylight Surface Oscillation Points in Strength Analysis of Multi-Support Structures. *Seismostoi'koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2006; (2): 22–25. (In Russian)
27. Savor Novak M., Lazarevic D., Atalic J., Uros M. Influence of Multiple-Support Excitation on Seismic Response of Reinforced Concrete Arch Bridges. *Applied Sciences*. 2019; 10 (1): 17. DOI: 10.3390/app10010017
28. Uzdin A.M. Specifics of Defining Seismic Action to Assess Earthquake Resistance of Long-Span Cable-Stayed Bridges. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*. 2008; (4): 53–64. (In Russian)
29. Mwafy A.M., Kwon O.S., Elnashai A., Hashash Y.M. Wave Passage and Ground Motion Incoherency Effects on the Seismic Response of an Extended Bridge. *Journal of Bridge Engineering*. 2011; 16 (3): 364–374. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.000015
30. Sextos A.G., Kappos A.J. Evaluation of Seismic Response of Bridges under asynchronous Excitation and Comparisons with Eurocode 8-2 Provisions. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2009; 7 (2): 519–545. DOI: 10.1007/s10518-008-9090-5
31. Sextos A.G., Pitilakis D., Kappos A. Evaluation of the new Eurocode 8-Part 2 provisions regarding asynchronous excitation of irregular bridges. In: *Proc. 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, Thessaloniki, 2012. Paper ID 04.
32. Stewart J., Crouse C. B., Hutchinson T., Lizundia B., Naeim F., Ostadan F. Soil-Structure Interaction for Building Structures. Grant/Contract Reports (NISTGCR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Report Number: 12-917-21. 2012. 292 p. Available: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495
33. Mkrtichev O.V., Dudareva M.S. Joint Work of Reinforced Concrete Building and Foundation Soil under Intense Seismic Effects. *Stroitel'stvo: Nauka i Obrazovanie*. 2018; (2): 28–42. (In Russian)
34. Mkrtichev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Modeling Structure-Foundation Interaction in Seismic Analysis. *Vestnik MGSU*. 2013; (12): 34–40. (In Russian)
35. Mkrtichev O.V., Lokhova E.M. Design of Earthquake-Resistant Buildings: New Generation Standards. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2024; (4): 42–46. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-4-42-46 (In Russian)
36. Tyapin A.G. Strength Analysis under Seismic Loads with Regard to Soil-Foundation Interaction. Moscow: ASV, 2016. 399 p. (In Russian)
37. Pshenichkina V.A., Drozdov V.V., Strok S.I. Influence of Foundation Stiffness on Dynamic Characteristics of Building Considered as Multi-Mass Cantilever Rod. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2020; 16 (4): 298–310. (In Russian)
38. Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S. Operational Safety of Building Foundations under Dynamic Impacts. *Vestnik MGSU*. 2017; 12 (5): 537–544. (In Russian)
39. Senkin N.A., Vasilev V.S. Actual Building Operation: Soil-Building Interaction and Lattice Supports of Overhead Power Lines. *Vestnik MGSU*. 2025; 20 (5): 637–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654 (In Russian)
40. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-Structure Interaction: A State-of-the-Art Review of Modeling Techniques and Studies on Seismic Response of Building Structures. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9: 1120351. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351
41. Zhan P., Xue S., Li X., Sun G., Ma R. Seismic Assessment of Large-Span Spatial Structures Considering Soil-Structure Interaction (SSI): A State-of-the-Art Review. *Buildings*. 2024; 14 (4): 1174. DOI: 10.3390/buildings14041174
42. Ngoc Nguyen T., Ngo V.L. A review of Soil-Foundation-Structure Interaction and Structure-Soil-Structure Interaction Effects based on Numerical Simulations. *Journal of Water and Land Development*. 2025; 1–12. DOI: 10.24425/jwld.2025.155295
43. Riaz M.R., Motoyama H., Hori M. Review of Soil-Structure Interaction based on Continuum Mechanics Theory and Use of High Performance Computing. *Geosciences*. 2021; 11 (2): 72. DOI: 10.3390/geosciences11020072

44. Kiureghian A.D. A Coherency Model for Spatially Varying Ground Motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 1996; 25 (1): 99–111. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<99::AID-EQE540>3.0.CO;2-C
45. Zerva A. Spatial Variation of Seismic Ground Motions: Modeling and Engineering Applications. Boca Raton. CRC Press, 2016. 486 p. DOI: 10.1201/9781420009910
46. Kramer S.L., Stewart J.P. Geotechnical Earthquake Engineering. CRC Press, 2024. 1060 p.
47. Shi J.Y., Chen S.S., Chen K.Y. A Simplified Model of Layered Soil for Analyzing Vertical Vibration of Loaded Foundations. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2022; 19 (1): 21–38. DOI: 10.1080/15732479.2021.1919152
48. Viktorov I.A. Surface Acoustic Waves in Solids. Moscow: Nauka, 1981. 287 p. (In Russian)
49. Freund L.B. Dynamic Fracture Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 83 p.
50. Mendriy Ya.V., Tyapkin Yu.K. Development of Coherence Calculation Technology based on Improved models of Seismic Recording. *Geofizicheskiy zhurnal*. 2012; 34 (3): 102–115. (In Russian)
51. Verzhbitskiy V.M. Fundamentals of Numerical Methods. Moscow: Vysshaya Shkola, 2009. 840 p. (In Russian)
52. Viktorov I.A. Physical Foundations of the Application of Ultrasonic Rayleigh and Lamb Waves in Engineering. Moscow: Nauka, 1966. 168 p. (In Russian)
53. Graff K.P. Wave Motion in Elastic Solids. Oxford: Clarendon Press, 1975. 682 p.
54. Frederick J.R. Ultrasonic Engineering. New York: Wiley, 1965. 382 p.
55. Troyan V.N., Uspenskii N.I., Saraev A.K. (Eds.). Problems of Geophysics. Saint-Petersburg, 2013. 177 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Саиян Сергей Гургенович, научный сотрудник, ст. преподаватель, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; мл. научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 119526, г. Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1, Berformert@gmail.com

Author Details

Sergey G. Saiyan, Research Scientist, Senior Lecturer, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 101-1, Vernadsky Ave., 119526, Moscow, Russia, Berformert@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.10.2025
Одобрена после рецензирования 23.10.2025
Принята к публикации 28.10.2025

Submitted for publication 01.10.2025
Approved after review 23.10.2025
Accepted for publication 28.10.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 288–297.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 288–297.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-288-297

EDN: XCKXXL

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСАДКИ ОСНОВАНИЙ КАРКАСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Сергей Иванович Герасимов, Виктор Михайлович Тихомиров,
Анатолий Михайлович Попов, Арина Владимировна Егорова,
Александр Александрович Спиридонов**

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Каркасные сооружения благодаря своей экономичности и скорости возведения широко используются в современном строительстве. Для обеспечения их долговечной и безопасной эксплуатации уже при проектировании нужно учитывать негативные последствия аварийных ситуаций, таких как неравномерная осадка фундамента или случайные динамические воздействия. Это позволит заблаговременно принять необходимые меры по усилению конструкций.

Цель работы – повышение достоверности оценки дополнительных усилий, действующих в элементах каркасного сооружения при неравномерной осадке его фундамента или динамическом воздействии.

Методы. Применен метод физического моделирования с помощью конструкционной системы PASCО, использующей тензометрические датчики для измерения усилий в элементах конструкции.

Результаты. Получены значения усилий в элементах модели каркасной конструкции при неравномерной осадке ее основания и при вертикальном ударном воздействии. Определены наиболее опасные варианты осадки основания и динамические коэффициенты для наиболее нагруженных элементов при вертикальном ударе.

Ключевые слова: каркасное сооружение, экспериментальное моделирование, неравномерная осадка фундамента, удар

Для цитирования: Герасимов С.И., Тихомиров В.М., Попов А.М., Егорова А.В., Спиридонов А.А. Моделирование неравномерной осадки оснований каркасных сооружений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 288–297. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-288-297. EDN: XCKXXL

ORIGINAL ARTICLE

MODELING OF NONUNIFORM SETTLEMENT OF FRAMED STRUCTURE FOUNDATIONS

Sergei I. Gerasimov, Viktor M. Tikhomirov, Anatoly M. Popov,
Arina V. Egorova, Aleksandr A. Spiridonov
Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

Abstract. Due to the high cost-effectiveness and construction speed of frame structures, they are widely used in modern construction. In the framed structure design, the most difficult computational problems are emergency situations, in particular, uneven foundation settlement and accidental dynamic impacts during the construction and operation. Understanding causes, consequences and methods of prevention the framed structure settlement, is critically important to ensure their durability and safety.

Purpose: The purpose of the work is to analyze the redistribution of efforts in framed structure elements in emergency situations.

Methodology: Experimental modeling based on the PASCO system is used to measure forces in the rods.

Research findings: The force redistribution in the elements mounted to a columnar foundation with nonuniform foundation settlement is identified. The most dangerous situations are identified, in which additional calculations or additional experimental model studies are required.

Value: The data obtained in the work show the effectiveness of using experimental modeling for further analysis and design of wireframe systems.

Keywords: frame structure, experimental modeling, nonuniform foundation settlement

For citation: Gerasimov S.I., Tikhomirov V.M., Popov A.M., Egorova A.V., Spiridonov A.A. Modeling of Nonuniform Settlement of Framed Structure Foundations. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 288–297. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-288-297. EDN: XCKXXL

При проектировании строительных конструкций каркасного типа, которые широко применяются в современном строительстве благодаря своей универсальности и экономичности [1], необходимо учитывать воздействия природного и техногенного характера [2–4]. Это – землетрясения, осадки основания, карсты, террористические акты, которые могут являться причиной аварии [5–8]. Поэтому исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) строительных конструкций при такого рода воздействиях весьма актуальны. На данный момент анализ НДС предпочтительнее проводить численными способами, основным из которых является метод конечных элементов [9]. При конечно-элементном моделировании не всегда корректно можно описать граничные условия задачи. Натурный эксперимент при аварийном воздействии не представляется возможным. Альтернативой является методика физического моделирования [10–14].

Распространенным аварийным воздействием на конструкцию зданий можно считать осадку фундамента, которую подразделяют на три основных типа: равномерная, неравномерная и крен. Наиболее опасная неравномерная осадка столбчатого фундамента. Также при строительстве и эксплуатации нередко сооруже-

ния испытывают динамические воздействия различного рода. При численном моделировании конструкций, испытывающих ударную нагрузку, практически невозможно учесть все жесткостные параметры системы «конструкция и тело, которое производит удар». Поэтому более корректно в данном случае использовать физическое моделирование и теорию подобия.

В настоящей работе рассмотрено физическое моделирование неравномерной осадки фундамента каркасной конструкции, а также ударного воздействия при ее строительстве. С помощью конструкционной системы PASCO [10] было проведено исследование перераспределения усилий в элементах модели конструкции при данных видах воздействий.

Моделировалось одноэтажное трехсекционное здание с двускатной крышей, установленное на фундаменте из восьми опор. Его 3D-модель показана на рис. 1. При высоте внутреннего помещения 2,5 м масштабный коэффициент подобия будет равен 45,5. В свою очередь, плотность материала модели в 8 раз меньше плотности стали. Следовательно, коэффициент подобия по массе будет равен $45,5 \cdot 8 = 364$. Для моделирования собственного веса, передающегося на стойки и раскосы каркаса, на перекрытие прикладывались 3 груза массой по 1 кг (рис. 2). Это соответствует собственному весу для данной конструкции, изготовленной из одинаковых стальных стержней замкнутого квадратного гнутого профиля $70 \times 70 \times 4$ с погонной массой 7,97 кг/м.

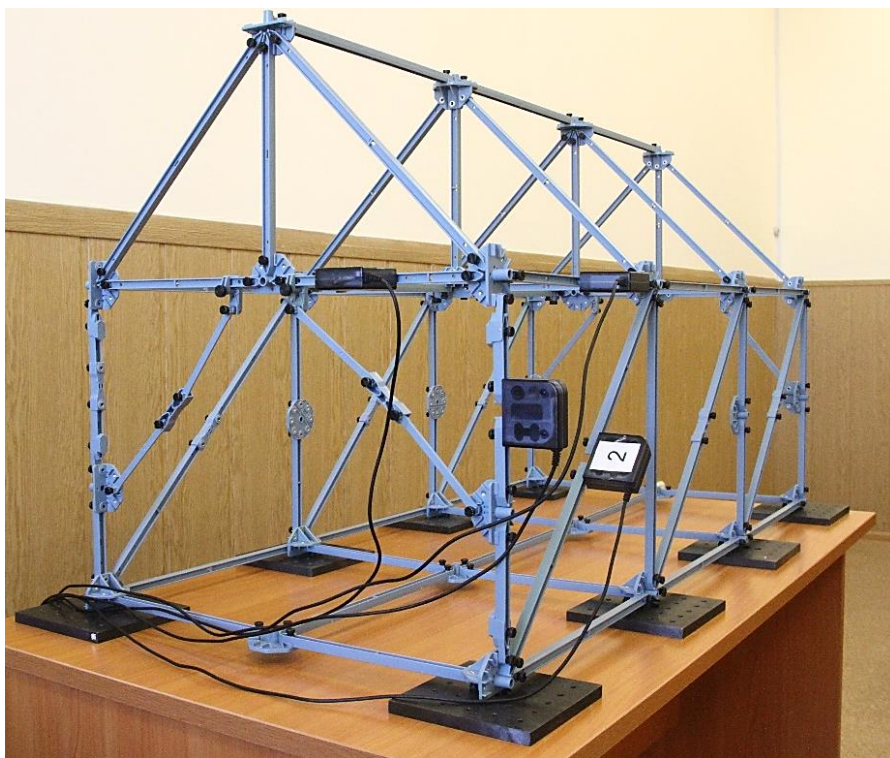


Рис. 1. Вид 3D-модели каркасного сооружения (цифрой 2 обозначен датчик)
Fig. 1. 3D model of a framed structure

Неравномерная осадка фундамента

Неравномерная осадка фундамента моделировалась путем удаления одной или двух опор. Пять опор, которые удалялись в процессе экспериментальных исследований, обозначены на рис. 2 буквами A, B, C, D, E.

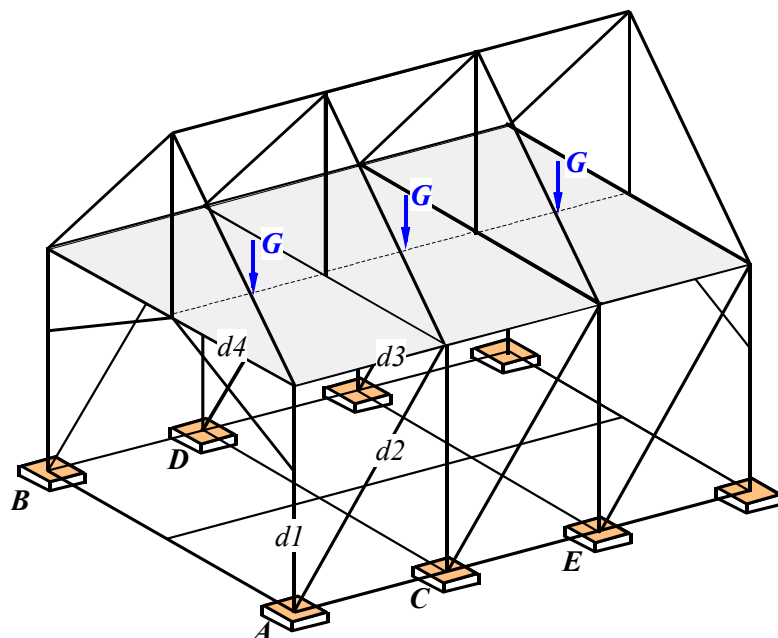


Рис. 2. Схема расположения опор, грузов и стержней с датчиками измерения усилий
Fig. 2. Schematic view of supports, weights and rods with force sensors

Для определения продольных сил в четырех элементах здания были установлены специальные тензометрические датчики конструктивной системы PASCO. Схема расположения датчиков представлена на рис. 2. Датчик d1 (на диаграмме Force 1) устанавливался на вертикальную стойку, датчик d2 (на диаграмме Force 2) – на раскос, датчики d3 (на диаграмме Force 3) и d4 (на диаграмме Force 4) – на стержнях верхнего пояса фермы. При данной установке датчиков было проведено пять опытов:

1. Статическое нагружение грузами $G = 10$ Н.
2. Нагрузка + осадка (удаление) опоры A.
3. Нагрузка + одновременная осадка (удаление) опор A и B.
4. Нагрузка + осадка (удаление) опоры C.
5. Нагрузка + одновременная осадка (удаление) опор C и D.
6. Нагрузка + одновременная осадка (удаление) опор A и E.

Для всех вариантов воздействий на модель фиксировались диаграммы «усилие – время» для четырех датчиков (d1–d4). На рис. 3 представлены диаграммы состояния усилий в четырех стержнях (1, 2, 3, 4) для случая осадки угловой опоры A, где в конечном счете были зафиксированы наиболее значимые изменения усилий. Для исключения влияния начальных усилий перед проведе-

нием каждого опыта производилась калибровка датчиков (показания сбрасывались до нуля). В связи с особенностями измерительного блока конструкционной системы PASCO на диаграммах положительное значение силы соответствует деформации «сжатие», а отрицательное – деформации «растяжение».

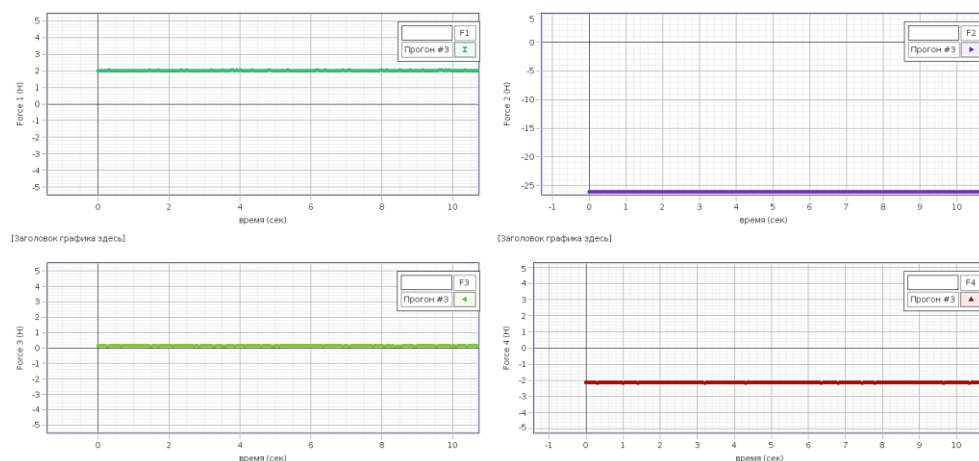


Рис. 3. Диаграммы «усилие – время» при проведении опыта № 2

Fig. 3. Force-time diagrams of the structure loading

Результаты измерений усилий для всех пяти опытов представлены в табл. 1. В табл. 2 показаны результаты расчета перераспределения усилий в стержнях по сравнению со статической нагрузкой при различных вариантах неравномерной осадки фундамента.

Таблица 1

Результаты измерений при неравномерной осадке основания

Table 1

Measurement results for nonuniform foundation settlement

Вид воздействия	Показания датчиков, Н			
	Датчик d1	Датчик d2	Датчик d3	Датчик d4
Статическое нагружение грузами	2,9	2,2	0,0	–3,0
Нагрузка + осадка (удаление) опоры A	2,0	–26	0,0	–2,0
Нагрузка + одновременная осадка (удаление) опор A и B	1,6	–27	0,2	–1,8
Нагрузка + осадка (удаление) опоры C	2,7	3,0	0,0	–2,7
Нагрузка + одновременная осадка (удаление) опор C и D	2,7	3,0	0,0	–2,7
Нагрузка + одновременная осадка (удаление) опор A и E	1,9	–28	0,1	–2,0

Таблица 2

Определение дополнительных усилий при неравномерной осадке основания

Table 2

Additional forces during nonuniform foundation settlement

Вид осадки основания	Приращение продольной силы, Н			
	Стойка	Раскос	Верхний 1	Верхний 2
Осадка опоры <i>A</i>	+1,9	+23,8	0,0	+1,0
Осадка опор <i>A</i> и <i>B</i>	+1,3	+24,8	−0,2	+1,2
Осадка опоры <i>C</i>	+0,2	−0,8	0,0	+0,3
Осадка опор <i>C</i> и <i>D</i>	+0,2	−0,8	0,0	+0,3
Осадка опор <i>A</i> и <i>E</i>	+1,1	+25,8	−0,1	+1,0

С учетом коэффициента подобия по массе в реальной конструкции усилия будут в 364 раза больше. Видно, что максимальная перегрузка в элементах конструкции наблюдается при осадке угловой опоры (на рис. 2 это опора *A*). При таком воздействии угловые панели испытывают сдвиговую деформацию, поэтому наибольшая перегрузка $n = \frac{|N_i|}{|N_{ст}|} = 11,7$ наблюдается в раскосе.

Динамическое воздействие

Динамическое воздействие на здание при строительстве моделировалось падением груза массой 0,2 кг с высоты 5 см. Это соответствует энергии удара $U = mgh = 0,2 \cdot 9,81 \cdot 0,05 = 0,098$ Дж или в пересчете на реальную конструкцию – удару в 35,7 Дж. Такой удар, например, может произойти при строительстве, ремонте или эксплуатации реальной конструкции, что соответствует падению груза массой 50 кг с высоты 7 см. На рис. 4 представлены схема расположения датчиков и положение падающего груза. На рис. 5 показаны диаграммы динамического процесса в четырех исследуемых стержнях. В табл. 3 даны результаты обработки данных диаграмм.

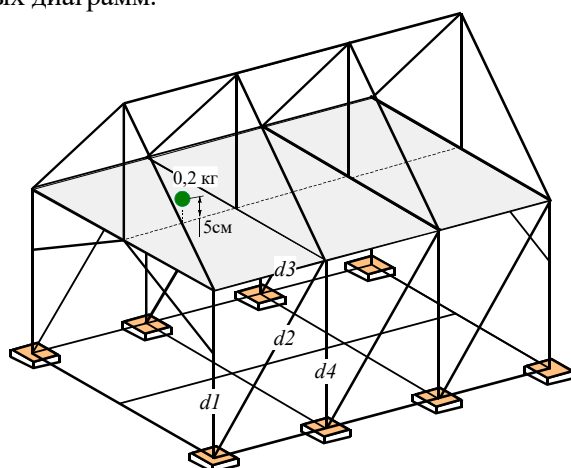


Рис. 4. Расположение датчиков и схема падения груза
Fig. 4. Arrangement of sensors and weight drop

На рис. 5 представлены диаграммы нагруженности в исследуемых элементах конструкции. В момент удара наблюдается всплеск показаний и дальнейшие затухающие колебания конструкции. По данным показаниям был проведен расчет динамического коэффициента по следующей формуле [15]:

$$k_{\text{дин}} = 1 + \mu = 1 + \frac{A_{\text{дин}}}{N_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{дин}}$ – максимальная амплитуда колебаний; $N_{\text{ст}}$ – статическая составляющая усилий; $\mu = A_{\text{дин}}/N_{\text{ст}}$ – динамическая добавка.

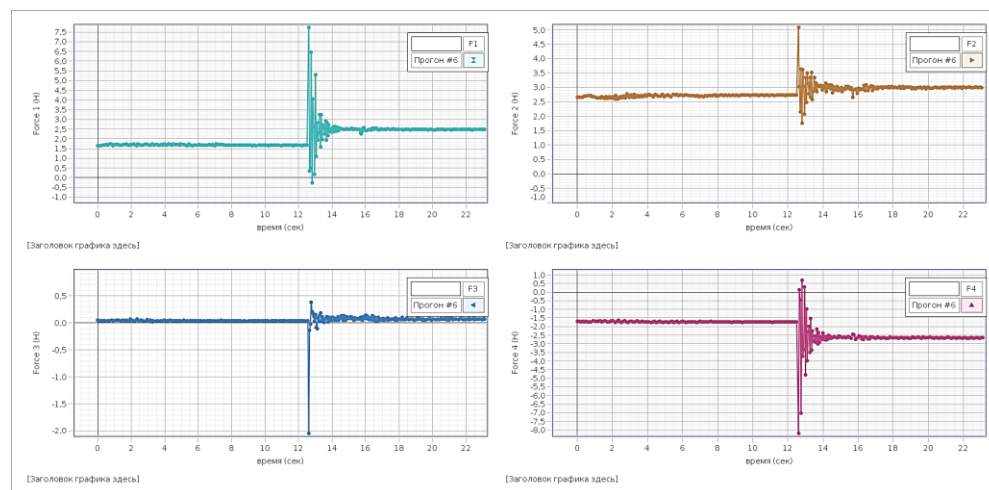


Рис. 5. Диаграммы при динамическом воздействии
Fig. 5. Diagrams of the dynamic impact

Результаты обработки диаграмм при ударном воздействии показаны в табл. 3.

Таблица 3

Результаты динамического воздействия

Table 3

Dynamic impact parameters

Номера стержней	Статическое усилие $N_{\text{ст}}$, Н	Максимальное усилие $N_{\text{дин}}$, Н	Амплитуда $A_{\text{дин}}$, Н	$k_{\text{дин}}$
1	1,7	7,8	4,1	3,4
2	2,7	5,1	3,4	2,3
3	0,1	2,1	1,2	12
4	1,7	8,2	4,5	3,6

При вертикальном ударе ожидаемо максимальные динамические усилия были зафиксированы в стойках (стержни 1 и 4), где отмечен максимальный динамический коэффициент. Большое значение динамического коэффициента для горизонтального элемента каркаса $k_{\text{дин}} = 12$ получено в малости статического усилия.

Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований каркасного сооружения при неравномерной осадке его фундамента и ударного динамического воздействия можно сделать следующие основные выводы:

1. Было проведено исследование перераспределения продольных усилий на модели каркасного сооружения при неравномерной осадке фундамента. Наиболее опасным является исключение из работы угловых опор по сравнению с осадкой внутренних, т. к. при таком воздействии угловые панели на здании будут испытывать более значимую сдвиговую деформацию, чем внутренние ячейки каркаса. По этой причине максимальная перегрузка была зафиксирована в раскосе крайней ячейки при осадке крайней опоры $n = 11,7$, а элементы верхнего пояса каркаса при этом оказываются менее чувствительны к такому воздействию. В связи с этим, чтобы выровнять значения перегрузок в элементах фермы при осадке основания, необходимо применять фундаменты в виде связанных контуров (ленточные или монолитные).

2. Осуществлено исследование распределения усилий при динамическом воздействии на примере падения груза.

3. Анализ нагруженности элементов различного рода конструкций с помощью метода физического моделирования можно применять для проверки результатов численного моделирования, а также доработки конечно-элементных моделей конструкций, особенно при динамических воздействиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рыбаков В.А., Гамаюнова О.С. Напряженно-деформированное состояние элементов каркасных сооружений из тонкостенных стержней // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 7 (12). С. 79–123.
2. Подшивалов И.И. Анализ несущей способности и устойчивости железобетонного безригельного каркаса экспериментального здания на различной стадии его работы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 26 (2). С. 104–112. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-104-112. EDN: HOISNK
3. Алейникова М.А., Соиты Н.Ю. Особенности расчета надежности поврежденных стальных конструкций // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1. С. 58–65. DOI: 10.25686/2542-114X.2024.1.58
4. Миронова Ю.В., Сулейманов А.М. Конструктивное решение стыка колонн с перекрытием в сборно-монолитном каркасе для повышения сопротивляемости прогрессирующему разрушению // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 135–144. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_135
5. Baza T.T., Rynkovskaya M.I., Dereje L.S., Dabi G.M., Ali Y.M. The effect of joint deformation on the seismic performance of exterior RC beam column joint // Modern Construction and Architecture. 2025. № 1 (56). DOI: 10.60797/mca.2025.56.1
6. Кондрашов В.В., Положнов А.В., Кондрашова И.В. Моделирование локальных разрушений сетчатых конструкций с учетом деформации поперечного сдвига // Экономика строительства. 2024. № 12. С. 315–318.
7. Qiu D., Chen J., Fu H. Research on the comprehensive evaluating index of seismic performance of underground large-scale frame structures // Structures. 2022. V. 37. P. 645–660. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.032
8. Великанов П.Г., Артюхин Ю.П. Исследование по динамике рамных конструкций // Гео-системы переходных зон. 2023. Т. 7. № 2. С. 180–195. DOI: 10.30730/gtr.2023.7.2.180-195
9. Радченков А.В., Аксенов В.Н. Методы расчета каркасных сооружений из монолитного железобетона на прогрессирующее обрушение на примере 17-этажного жилого дома // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. С. 1–12.

10. Герасимов С.И., Тихомиров В.М., Бахтин С.А. Экспериментальная оценка перераспределения усилий в элементах модели пролетного строения моста, получившего повреждения при временной нагрузке от подвижного состава // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 220–229. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-220-229
11. Ren G., Xue J., Ding Y. Experimental and numerical research on the lateral behavior of glued timber frame structures with and without X-type diagonal bracing // Structures. 2023. V. 58. Article 105626. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105626
12. Tsai M.-H., Lee Y.-C. Practical Structural Design and Construction of an Innovative Composite Plastic Greenhouse // Agriculture. 2021. V. 11. № 11. Article 1051. DOI: 10.3390/agriculture11111051
13. Turdiyev Sh.R. The need for the implementation of PASCO digital laboratories, which provides the possibility of digitalization of STEAM sciences // American Journal of Pedagogical and Educational Research. 2023. № 19. P. 161–164.
14. Dmitrieva T.L., Podshivalova K.A. Experimental and theoretical studies of dynamic characteristics of wooden frame buildings // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. V. 19. № 2. P. 136–149. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-136-49
15. Бондарь Г.М., Козьмин З.Г., Ройтбурд В.П. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом. Москва : Транспорт, 1984. 272 с.

REFERENCES

1. Rybakov V.A., Gamayunova O.S. Stress-strain state of elements of frame structures made of thin-walled rods. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2013; (7 (12)): 79–123. (In Russian)
2. Podshivalov I.I. Bearing Capacity and Stability of Reinforced Concrete Composite Frame Without Collar Beams at Different Stages of Material Operation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (2): 104–112. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-104-112 (In Russian)
3. Aleinikova M.A., Soitu N.Yu. Reliability Assessment of Damaged Steel Structures. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii*. 2024; (1): 58–65. DOI: 10.25686/2542-114X.2024.1.58 (In Russian)
4. Mironova Yu.V., Suleimanov A.M. Constructive Solution for Connecting Columns with Cross-Bracing in a Composite-Monolithic Frame for Improvement of Progressive Collapse Resistance. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2023; (3 (65)): 135–144. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_135 (In Russian)
5. Baza T.T., Rynkovskaya M.I., Dereje L.S., Dabi G.M., Ali Y.M. The Effect of Joint Deformation on the Seismic Performance of Exterior RC Beam Column Joint. *Modern Construction and Architecture*. 2025; (1 (56)). DOI: 10.60797/mca.2025.56.1
6. Kondrashov V.V., Polozhnov A.V., Kondrashova I.V. Modelirovanie lokal'nykh razrushenii setchatykh konstruktsii s uchetom deformatsii poperechnogo sdviga. *Ekonomika stroitel'stva*. 2024; (12): 315–318. (In Russian)
7. Qiu D., Chen J., Fu H. Research on the comprehensive evaluating index of seismic performance of underground large-scale frame structures. *Structures*. 2022; 37: 645–660. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.032.
8. Velikanov P.G., Artyukhin Yu.P. Dynamics of Framed Structures. *Geosistemy perekhodnykh zon*. 2023; 7 (2): 180–195. DOI: 10.30730/gtr.2023.7.2.180-195 (In Russian)
9. Radchenkov A.V., Aksenov V.N. Strength Analysis of Monolithic Reinforced Concrete Structures for Progressive Collapse of a 17-Story Residential Building. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016; (4): 1–12. (In Russian)
10. Gerasimov S.I., Tikhomirov V.M., Bakhtin S.A. Experimental Assessment of Force Redistribution in Elements of Damaged Bridge Model Under Temporary Load from Rolling Stock. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (4): 220–229. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-220-229 (In Russian)
11. Ren G., Xue J., Ding Y. Experimental and Numerical Research on the Lateral Behavior of Glued Timber Frame Structures with and without X-Type Diagonal Bracing. *Structures*. 2023; 58: 105626. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105626

12. Tsai M.-H., Lee Y.-C. Practical Structural Design and Construction of an Innovative Composite Plastic Greenhouse. *Agriculture*. 2021; 11 (11): 1051. DOI: 10.3390/agriculture11111051
13. Turdiyev Sh.R. The need for the implementation of PASCO digital laboratories, which provides the possibility of digitalization of STEAM sciences. *American Journal of Pedagogical and Educational Research*. 2023; (19): 161–164.
14. Dmitrieva T.L., Podshivalova K.A. Experimental and Theoretical Studies of Dynamic Characteristics of Wooden Frame Buildings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023; 19 (2): 136–149. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-136-49
15. Bondar' G.M., Koz'min Z.G., Roitburd V.P. Interaction of railway bridges with rolling stock. Moscow: Transport, 1984. 272 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Герасимов Сергей Иванович, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, 912267@mail.ru

Тихомиров Виктор Михайлович, докт. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, twm@stu.ru

Попов Анатолий Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, 47604@mail.ru

Егорова Арина Владимировна, студентка, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, 912267@mail.ru

Спирidonov Александр Александрович, студент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, 912267@mail.ru

Authors Details

Sergei I. Gerasimov, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, 912267@mail.ru

Viktor M. Tikhomirov, DSc, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, twm@stu.ru

Anatoly M. Popov, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, 47604@mail.ru

Arina V. Egorova, Student, Siberian State Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, 912267@mail.ru

Aleksandr A. Spiridonov, Student, Siberian State Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, 912267@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.12.2025
Одобрена после рецензирования 12.02.2026
Принята к публикации 12.02.2026

Submitted for publication 02.12.2025
Approved after review 12.02.2026
Accepted for publication 12.02.2026