

[illegible]

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 учебной работе ТГАСУ, г. Томск; study@tsuab.ru
Галютин З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; zgalyutdinov@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, проректор по научной работе 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; kopanitsa@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
Лютос В.А., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; valotov@tpu.ru
Люсия Тсантисис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; lucia.tsanilis@polito.it
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@ya.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
Тептаев Б.Б., докт. техн. наук, профессор, академик Национальной инженерной академии РК и Международной академии транспорта, г. Алматы, Республика Казахстан; bagdatbt@yahoo.com
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, г. Москва; travush@mail.ru
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ, г. Томск; nac@tsuab.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
Чулин 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 ТГАСУ № 3 – 2023

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

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций ПИ №77-9483 от 30 июля 2001 г.
Журнал перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-81849 от 24 сентября 2021 г.

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

Редакторы Т.С. Володина, Е.А. Куленова. Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш. Технический редактор Н.В. Удлер.
Подписано в печать 21.06.2023. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 15,25. Усл. печ. л. 18,11. Тираж 200 экз.
Зак. № 37.

Дата выхода: 28.06.2023.
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, 2023

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL

OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 25

№ 3 2023
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

This image shows a full page of blank, lined paper. It features approximately 20 horizontal black lines spaced evenly apart, typical of notebook paper. The lines extend across the entire width of the page, leaving small margins at the top and bottom. There are no vertical lines or other markings present.

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, Vice-Rector for Research, 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; zgalyautdinov@tsuab.ru
Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; tsp_tgasu@mail.ru
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow, Russia; ilyichev@raasn.ru
Kaprielov S.S., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Laboratory at Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia; kaprielov@masterbeton-mb.ru
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies, TSUAB, Tomsk, Russia; kopanitsa@mail.ru
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; bagdatbi@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.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 Academic Affairs, 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 ARHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE No 3 – 2023
Print ISSN 1607-1859 Online ISSN 2310-0044

The journal is registered by the Federal Agency on Press and Mass Communications of the Russian Federation PI N77-9483, 30 July, 2001.
The journal is re-registered by the Federal Supervision Service for Communication, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)
PI N FS77-81849, September 24, 2021.

Founder: Tomsk State University of Architecture and Building

Editors T.S. Volodina, E.A. Kuleshova. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 21.06.2023. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 28.06.2023.
Published sheets: 15,25. Conventional printed sheets: 18,11. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 37.

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, 2023

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Игнатенкова В.А., Вайтенс А.Г. Этапы формирования системы расселения вдоль реки Ангары (середина XVII – начало XXI в.) (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург).....	9
Скуднева М.В. Основы сохранения культурного ландшафта в среде исторического сибирского города (НГУАДИ, г. Новосибирск)	23
Шестеров Е.А. Создание координированной транспортной системы при территориально-транспортном планировании развития городских территорий (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург)	30
Целуйко Д.С., Кирпо А.Р. Исследование характеристик планировочной структуры с использованием графоаналитических схем и инструментов теории пространственного синтаксиса (ТОГУ, г. Хабаровск).....	39
Кутуков А.А., Колокольцева Е.Н., Романова Л.С. Инженерные вопросы реставрации. Влияние роста культурного слоя на сохранность объектов культурного наследия на примере каменных храмов города Томска (ТГАСУ, г. Томск).....	54
Малова Е.Д. Соотношение площадей жилой застройки, объектов обслуживания и научно-производственной зоны наукоградов России (НГУАДИ, г. Новосибирск)	70
Югай В.В., Ситникова Е.В. Традиции классицизма в деревянной застройке города Тюмени второй половины XIX – начала XX века. Материалы натурных исследований (ТГАСУ, г. Томск).....	81

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Морозов Н.А., Гребенюк Г.И., Максак В.И., Гаврилов А.А. Исследования собственных колебаний прямоугольных пластин (ТГАСУ, г. Томск, ОГУ, г. Оренбург).....	96
Снянов А.И., Ярошевич Д.К. Расчет цилиндрических сетчатых покрытий с учетом уравнений движения (ЛФ ПНИПУ, г. Лысьва).....	112
Подшивалов И.И. Расчетное обоснование способа усиления железобетонных стропильных ферм промышленного здания (ТГАСУ, г. Томск)	120
Конин Д.В. Жесткость частично обетонированных стальных балок и сталежелезобетонных перекрытий (ЦНИИСК, г. Москва).....	128
Ющубе С.В., Тарасов А.А., Устюгов А.С. Развитие осадок зданий при понижении грунтовых вод на оползневой территории Лагерного сада в г. Томске (ТГАСУ, г. Томск)	143

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Шеховцов В.В. Стеклокерамика на основе шпинели $MgAl_2O_4$, полученная методом плазменной плавки (ТГАСУ, г. Томск)	151
--	-----

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ,
СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Продоус О.А., Шлычков Д.И. Коэффициент эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения как фактор оценки возможности продолжения дальнейшей их эксплуатации (ООО «ИНКО-эксперт», г. Санкт-Петербург, НИ МГСУ, г. Москва).....	162
---	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Алькаев Е.Н., Лунёв А.А. Исследование влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта (СибАДИ, г. Омск).....	169
---	-----

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

Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Исследование изменений состояния и свойств волокон дисперсной арматуры в процессе строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий (ТГАСУ, г. Томск)	185
Разуваев Д.А., Чахлов М.Г. Обоснование границ капиллярного барьера из инъектированного раствора для предотвращения морозного пучения земляного полотна (СТУПС, г. Новосибирск).....	197

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Ignatenkova V.A., Vaitens A.G. Settlement formation along the Angara river (mid 17th and early 21st centuries) (Saint-Petersburg).....	9
Skudneva M.V. Preservation of cultural landscape in the historical Siberian city (Novosibirsk)	23
Shesterov E.A. Coordinated transport system in territory and transportation development in urban areas (Saint-Petersburg).....	30
Tseluiko D.S., Kirpo A.R. Graph-analytic models and space syntax tools for planning structure characterization (Khabarovsk)	39
Kutukov A.A., Kolokol'tseva E.N., Romanova L.S. Engineering issues in restoration. Cultural deposit growth effect on preservation of stone churches in Tomsk (Tomsk).....	54
Malova E.D. Correlation between residential area, service facilities, research and production zone of Russian science cities (Novosibirsk).....	70
Yugai V.V., Sitnikova E.V. Classicism in Tyumen wooden architecture late in the 19th and early 20th centuries. Field research (Tomsk).....	81

BUILDING AND CONSTRUCTION

Morozov N.A., Grebenyuk G.I., Maksak V.I., Gavrilov A.A. Free vibrations of rectangular plates (Tomsk, Orenburg).....	96
Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Calculation of cylindrical mesh coatings based on equations of motion (Lysva)	112
Podshivalov I.I. Reinforcement analysis of concrete roof frames of industrial building (Tomsk)	120
Konin D.V. Rigidity of partially concreted steel beams and steel-reinforced floors (Moscow).....	128
Yushchube S.V., Tarasov A.A., Ustyugov A.S. Building foundation settlement in groundwater lowering on sliding territory of Lagerny Garden in Tomsk (Tomsk).....	143

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Shekhovtsov V.V. MgAl ₂ O ₄ -based glass ceramics synthesized by thermal plasma melting (Tomsk)	151
--	-----

WATER SUPPLY, SEWERAGE,
BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Prodous O.A., Shlychkov D.I. Efficiency coefficient of water supply and removal as an assessment factor of further operation (Saint-Petersburg, Moscow)	162
---	-----

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Alkaev E.N., Lunev A.A. Concentrated effect of drying agents on mechanical performance of clay soil (Omsk).....	169
---	-----

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

Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Modification of conditions and properties of dispersed reinforcing fiber during construction and operation of asphalt concrete pavements (Tomsk).....	185
Razuvaev D.A., Chakhlov M.G. Arrangement of capillary barrier made of injected solution to prevent subgrade frost heaving (Novosibirsk)	197

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 9–22.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 9–22.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711:502

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-9-22

EDN: HJMXTB

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РАССЕЛЕНИЯ ВДОЛЬ РЕКИ АНГАРЫ (СЕРЕДИНА XVII – НАЧАЛО XXI В.)

Вера Артемовна Игнатенкова, Андрей Георгиевич Вайтенс

Санкт-Петербургский государственный

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

Аннотация. Рассмотрена система расселения вдоль р. Ангары в границах Иркутской агломерации на различных этапах формирования и возможности её градостроительного развития.

Актуальность темы исследования заключается в поиске особенностей сложившейся системы расселения вдоль Ангары в пределах границ Иркутской агломерации.

Целью исследования является выявление возможностей формирования рассматриваемой системы расселения.

Поставлен ряд важных **задач**: выявить особенности каждого этапа формирования системы расселения с точки зрения природно-ресурсного, градостроительного, транспортного и социально-экономического потенциалов в исследуемых границах; определить проблематику и ключевые точки пространственного развития (опорные узлы) существующей системы расселения; предложить пути решения обозначенных проблем.

Методы, применяемые в исследовании, основаны на градоэкологических принципах А.Г. Большакова с учётом других источников и литературы по теме исследования.

В результате выявлены особенности существующей планировочной системы рассматриваемых территорий, сформированной транспортным, экономическим и ландшафтно-экологическим каркасами. Пересечение главных и второстепенных осей данных каркасов между собой может стать основой возникновения узлов расселения населения (в т. ч. особенностей узлов) и опорной точкой пространственного развития. В заключении предложены возможные пути решения выявленных проблем.

Ключевые слова: система расселения, Иркутская область, городская агломерация, урбанизация, градостроительная экология

Для цитирования: Игнатенкова В.А., Вайтенс А.Г. Этапы формирования системы расселения вдоль реки Ангары (середина XVII – начало XXI в.) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 9–22. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-9-22. EDN: HJMXTB

ORIGINAL ARTICLE

SETTLEMENT FORMATION ALONG THE ANGARA RIVER (MID 17TH AND EARLY 21ST CENTURIES)

Vera A. Ignatenkova, Andrey G. Vaytens

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

Abstract. Purpose: Identification of possible settlement formation along the Angara River in the Irkutsk agglomeration at different formation stages and its urban development.

Design/methodology/approach: A number of outlined important tasks include the description of each formation stage of settlement with respect to natural resources, urban planning, transport and socio-economic potential; identification of problems and key points of the spatial development of the existing settlement system; solutions of the identified problems. Urban-ecological principles developed by A.G. Bolshakov are used together with the literature in the field.

Research findings: The considered existing planning system includes transport, economic and landscape-ecological facilities.

Practical implications: The paper suggests possible ways to solve the identified problems.

Originality/value: The mentioned facilities can serve as a basis for the settlement formation and spatial development.

Keywords: settlement system, Irkutsk region, urban agglomeration, urbanization, urban ecology

For citation: Ignatenkova V.A., Vaytens A.G. Settlement formation along the Angara river (mid 17th and early 21st centuries). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 9–22. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-9-22. EDN: HJMXTB

Введение

Расселение понимается как исторически складывающаяся или сложившаяся сеть населённых пунктов. Система поселений, как сложное и многогранное понятие при изучении расселения, представляет собой комплексную и функционально взаимосвязанную совокупность поселений [1].

Современное развитие общества нуждается в контроле за процессом расселения. По сути, расселение – это направления территориального развития с возможностью удобных передвижений между местами приложения труда, проживания и рекреацией. Для эффективного функционирования такой системы территория должна обладать некоторым природно-ресурсным и промышленным потенциалами [2].

Очевидна тесная историческая связь расселения с сетью рек, которые служат существующими коммуникационными коридорами, направляя и распределяя население. Так, в России начала XX в. почти весь культурный ландшафт является следствием природного ландшафта, формирующего сеть реч-

ных долин. Сейчас культурный ландшафт в большей степени оторван от природного и наложен на линейно-узловой каркас магистралей и поселений. Все большее значение в системах расселения приобретают агломерации [3].

Кроме того, решение инфраструктурных проблем требует надёжного процесса планирования, который включает в себя изучение социальных и экологических систем, поддерживающих инфраструктуру, наряду с техническими системами [4].

Таким образом, учитывая особенности функционирования системы расселения, можно выделить следующие аспекты её формирования:

- природно-ресурсный – поиск градостроительных узлов системы расселения, опирающийся на существующий природный и ресурсный потенциалы;
- градостроительный – планировочная организация системы расселения;
- транспортный – транспортная сеть (в совокупности с населёнными пунктами) формирует транспортный каркас;
- социально-экономический – выявление социальных и экономических предпосылок для всестороннего развития условий жизни как общества в целом, так и отдельного человека, создание системы расселения в пределах определённого экономического района.

Этапы формирования системы расселения вдоль р. Ангары в границах Иркутской агломерации

Бассейн Ангары был издавна заселён кочевыми местными племенами. Однако развитие территорий Приангарья началось в середине XVII в. в связи с освоением региона русскими и включением его в состав России. Ангара как главная коммуникационная артерия сыграла ключевую роль в освоении и развитии прилегающих территорий (рис. 1). Береговая линия реки постепенно формировалась острогами, которые со временем превращались в города (в том числе Иркутский острог, будущий г. Иркутск – ядро Иркутской агломерации).

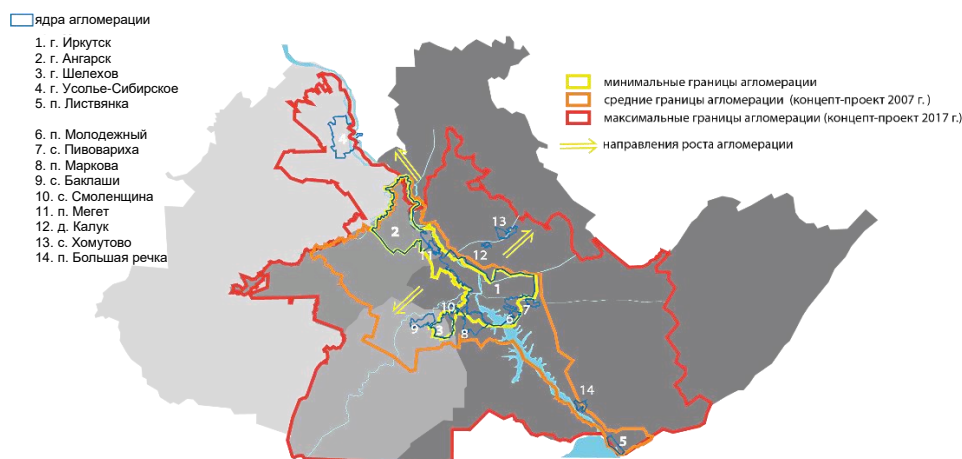


Рис. 1. Предлагаемые границы Иркутской агломерации в системе границ существующего районирования

Fig. 1. Proposed boundaries of Irkutsk agglomeration in existing zoning boundaries

Этап I – дореволюционный (середина XVII в. – 1917 г.): начало изучения Байкало-Ангарского бассейна; освоение Приангарья – появление первых поселений, будущих городов (рис. 2).

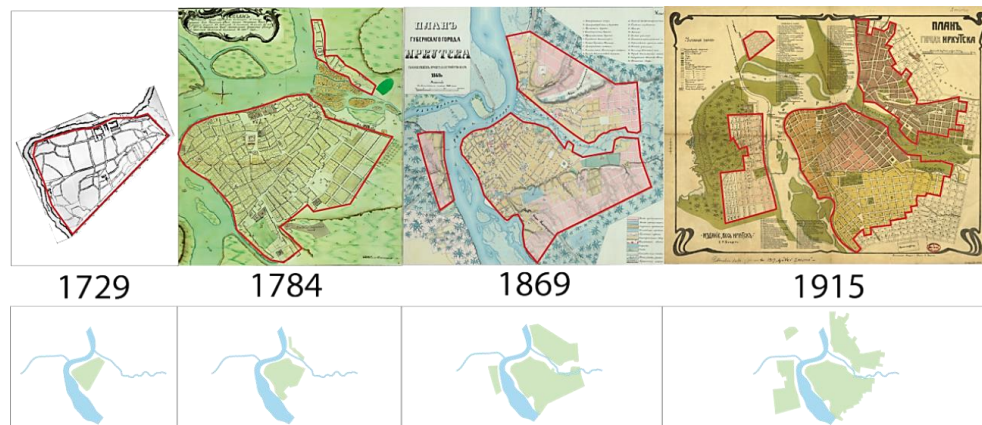


Рис. 2. Этап I – дореволюционный (середина XVII в. – 1917 г.): сочетание реки и пятен исторической застройки ядра Иркутской агломерации

Fig. 2. Pre-revolutionary stage I (mid 17th century, 1917): Combination of the river and historical development in Irkutsk agglomeration

Закрепление русских поселений в прибрежной полосе р. Ангары произошло в конце XVII в. Тогда же картографом была зафиксирована сеть основных островов на Ангаре: Иркутский, Братский, Яндинский, Идинский, Балаганский, Рыбинский. Взаимосвязи между поселениями были выявлены исходя из наличия межселенческих дорог, ареала расположения деревень, заимок в радиусе территориальной доступности, который основывался на существовавших тогда средствах передвижения. При этом визуальный анализ сети показал, что поселения в бассейнах рек располагались, как правило, локально и существовали во взаимосвязи с малыми центрами притяжения в виде островов [5].

Весь Иркутский регион до XX в. был представлен в виде разрозненных поселений: г. Иркутск (1661) – столица Иркутской губернии; прилегающие сельские поселения; отдельные промысловые сельские поселения, давшие начало городам (Усолъе-Сибирское (1669), Черемхово (1772) и др.).

Ландшафтной основой территорий будущей агломерации стали долина р. Ангары и Иркутский амфитеатр: Олхинское плато и южная часть Приморского хребта на берегу Байкала. Ландшафтные оси по долине Ангары образовали крест Ангара – Иркут – Ушаковка, на котором и расположился Иркутск [6].

Река Ангара как главная водная артерия взяла на себя роль оси формирования системы расселения.

Прослеживалось разнообразие растительности, в особенности лесной – практически все пространство региона было покрыто тайгой, состоящей преимущественно из хвойных пород.

Планировочная структура Иркутского острога определила структуру будущих городских кварталов. Приоритетное направление в дальнейшем раз-

витии Иркутского поселения было определено на юго-восток. После организации постоянных переправ в XVIII в. через Ангару население устремилось на левый берег реки. В связи с пожаром 1869 г. Иркутск получил возможность провести регулярную перепланировку своей центральной части. Заложенные генеральным планом 1899 г. проектные предложения были рассчитаны на перспективу и стали реальной основой для развития и строительства Иркутска первых десятилетий XX в.

На правом берегу Ангары в районе Иркутска начали сооружать береговые укрепления для защиты берега от размыва из-за частых наводнений. В XIX в. Г.С. Батеньковым в Иркутске был разработан проект по берегоукреплению Ангары, который вскоре был утверждён и принят к исполнению [7].

Транспортные сухопутные пути представлены в виде нескольких трактов: Московский, или Большой Сибирский (главный торговый путь), продолжение его составлял Кругобайкальский (вдоль р. Иркут, через наиболее обжитые поселения и прибайкальские горы к южному побережью Байкала), Якутский (почтовый), Заангарский (по правому берегу р. Ангары), Тункинский (в Монголию по долине р. Иркут).

По Ангаре, несмотря на бурное течение реки, и по озеру Байкал осуществлялось довольно деятельное пароходное сообщение. Кроме того, в п. Листвянка действовала судоверфь, на которой были построены и с которой начали своё путешествие знаменитые ледоколы «Байкал» и «Ангара».

Транссибирская железная дорога (Транссиб), строительство которой началось в конце XIX в. и завершилось в начале XX в., стала одной из главных составляющих транспортного каркаса агломерации и осью формирования системы расселения, как и р. Ангара.

Ангара имела большое значение и в экономической жизни Приангарья, она составляла водный путь на запад и служила для сплава товаров из Иркутской губернии в Енисейскую. Торговля в целом была достаточно хорошо развита, чему способствовал пересекающий регион транзитный путь на Красноярск.

Долины Ангары, в свою очередь, используются в земледелии – главном занятии жителей, как наиболее пригодные.

В связи с отдалённостью Иркутского региона от центра страны фабричная и заводская промышленность была развита слабо. Большая часть предприятий находилась в Иркутске. Исключением стала построенная енисейскими казаками соляная варница на месте соляного источника в поселении Усолье-Сибирское.

Аналогичная ситуация сложилась с социальной составляющей Приангарья: объекты социального назначения сконцентрированы в городе, однако их количество крайне мало.

Этап II – советский (1917 г. – 1990-е гг.): послевоенное восстановление; начало формирования Иркутской агломерации (рис. 3).

В 1920–30-х гг. советская власть создала условия для развития рыночных отношений (ввод новой экономической политики (НЭП)) для восстановления производительных сил и экономики после Гражданской войны. В результате в Иркутске быстро росло число негосударственных магазинчиков,

а в районе понтонного моста через Ангару на правом берегу обосновался целый рынок из ряда частных лавочек.

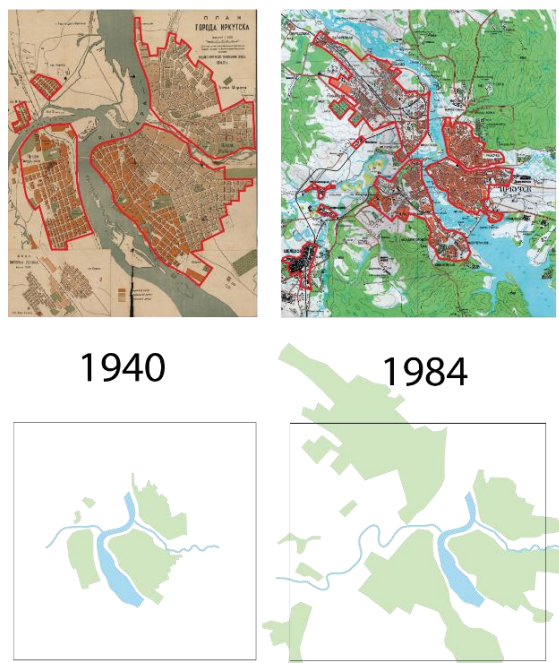


Рис. 3. Этап II – советский (1917 г. – 1990-е гг.): сочетание реки и пятен исторической застройки ядра Иркутской агломерации

Fig. 3. Soviet stage II (1917–1990s): Combination of the river and historical development in Irkutsk agglomeration

В этот период по стране прокатился ряд административных и градостроительных реформ, шло становление советской архитектуры. В 1930-е гг. в Приангарье набирает обороты индустриализация: начало создания топливно-энергетического комплекса на основе гидроэнергии Ангары; формирование машиностроительной, лесохимической и электроэнергетической отраслей; расширение базы деревообработки и пр.

После революции 1917 г. план г. Иркутска появился только в 1941 г. Однако его реализация началась после Великой Отечественной войны с внесением некоторых изменений. Согласно новому плану Иркутска 1941 г. на берегах Ангары появились промышленные предприятия с многочисленными складскими территориями и транспортными магистралями. Таким образом, с одной стороны, город стал крупным промышленным центром на востоке страны, с другой – явно прослеживалось неравномерное зонирование и неорганизованность застройки. Помимо интенсивной застройки заводских площадей, полным ходом велось строительство жилых посёлков при заводах по локальным планам.

1950-е гг. в целом характеризовались началом мощного послевоенного подъёма промышленного и транспортного освоения Иркутского региона.

На действующем в Иркутске заводе тяжёлого машиностроения (ИЗТМ), а также на заводах стратегического значения – авиационном и релейном – началась послевоенная перестройка всего производства и (или) реконструкция энергохозяйства заводов в связи с запуском Иркутской ГЭС (1956). Построен Иркутский алюминиевый завод. Развивался завод «Усольехимпром» в Усолье-Сибирском. Кроме того, благодаря новым градообразующим предприятиям были образованы новые города – Ангарск (1948) и Шелехов (1953), что способствовало созданию связей между ними и Иркутском и положило начало формированию Иркутской агломерации [8].

Строительство Иркутской ГЭС повлияло и на ландшафт прибрежных территорий, попавших в зону затопления. Так первоначальная двухрядная застройка главной улицы п. Листвянка преобразовалась в однорядную.

Актуальным стало углубленное изучение режимов водных объектов Байкало-Ангарского бассейна для прогнозирования их экологического состояния и поиска мероприятий по их сохранению и (или) восстановлению.

За XX в. в результате антропогенного воздействия берега Ангары претерпели существенные изменения. Был построен первый мост (Глазковский) через Ангару, соединяющий центральную (правобережную) и левобережную части города. Кроме того, на правом берегу была благоустроена набережная. На левом берегу, на сравнительно небольшой территории, помимо железной дороги оказалась сконцентрирована промышленность.

Этап III – современный (1990-е гг. – начало XXI в.): сложившаяся система расселения вдоль Ангары в пределах Иркутской агломерации (рис. 4).

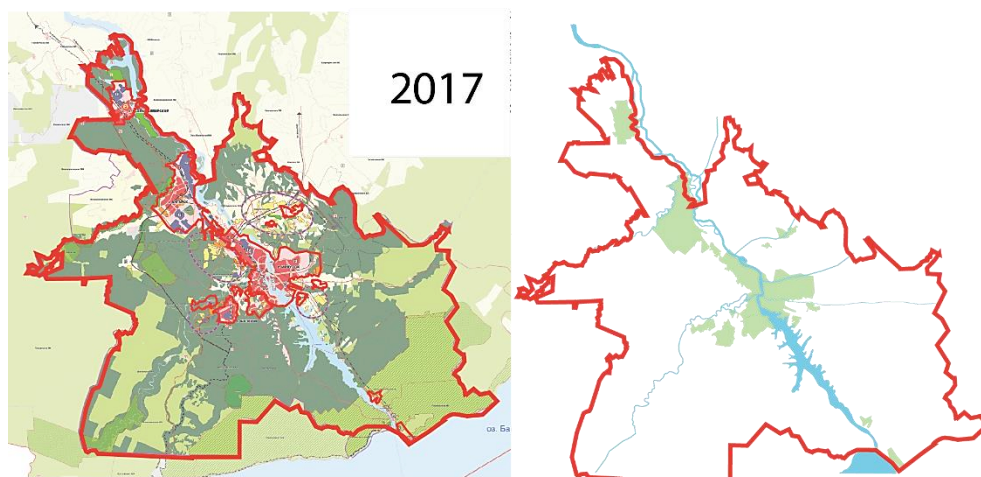


Рис. 4. Этап III – современный (1990-е гг. – начало XXI в.): сочетание реки и пятен существующей застройки Иркутской агломерации

Fig. 4. Contemporary stage III (1990s and early 21st century): combination of the river and existing development in Irkutsk agglomeration

После кризисных 1990-х гг. было возобновлено развитие Иркутска и других населённых пунктов региона, что способствовало формированию Иркутской агломерации в привычном для нас современном виде. В начале

2000-х гг. произошёл резкий рост пригородных пространств, что привело к изменению архитектурного ландшафта.

Явно прослеживается, что сложившаяся планировочная структура агломерации повторяет форму ландшафтных осей рек Байкало-Ангарского бассейна, где Ангара является *главной природной осью* формирования системы расселения.

Транссиб, пересекая все основные населённые пункты агломерации и являясь частью её транспортного каркаса, представляет собой *главную транспортную ось* формирования системы расселения.

Кроме того, важными составляющими транспортного каркаса являются следующие автомобильные тракты (*второстепенные транспортные оси*): Московский (федеральная трасса), Качугский («Северный луч»), Байкальский (до Листвянки вдоль Ангары на побережье Байкала), Култукский (в сторону Слюдянки, юг Байкала) и Голоустненский (по левобережью р. Ушаковки на юго-восток) [6].

Срастание поселений происходит неравномерно: между Шелеховом и Иркутском полностью исчез разрыв в виде нетронутых природных территорий, в отличие от имеющегося разрыва между Ангарском и Усольем-Сибирским, а срастанию Ангарска с Иркутском препятствует промышленный пояс Ангарска. Такие неравномерные преобразования, и недостаточно развитая система междугороднего сообщения в том числе, препятствуют устойчивому развитию Иркутской агломерации.

Наиболее подвергшимися антропогенному воздействию территориями являются: центральные территории Иркутска, территории Ангарска и Шелехова как промышленных центров агломерации, бывшие промышленные территории Усоля-Сибирского как нуждающиеся в рекультивации. Кроме того, берега Ангары и её притоков находятся в зоне риска затопления и подтопления.

Благодаря широкому спектру производственных и непроизводственных сфер деятельности, а также разнообразию объектов социальной инфраструктуры Иркутск обладает наибольшим социально-экономическим потенциалом, по сравнению с другими основными населёнными пунктами Иркутской агломерации. Туризм является основой экономики Листвянки. Экономический потенциал Ангарска, Шелехова и Усоля-Сибирского достаточно велик за счёт градообразующих промышленных предприятий. Усолье-Сибирское, как сопоставимый по возрасту с Иркутском город, обладает возможностью развиваться и в туристической сфере. Социальная инфраструктура этих населённых пунктов является в большей степени наследием советских времён и немногочисленна. Однако если рассматривать города по отдельности, то их социальный потенциал вполне достаточен.

Современные проблемы и особенности формирования системы расселения вдоль Ангары в границах Иркутской агломерации

Сегодня при разработке концепции пространственной организации среды (в рамках схем территориального планирования, генеральных планов, документов стратегического планирования) должна учитываться совокупность

природных, историко-культурных, градостроительных, транспортных и социально-экономических свойств, характерных для исследуемых территорий [3].

Потенциал развития узлов расселения обусловлен их экономико-географическим положением, а именно расположением на пересечении важных планировочных осей – *природных и транспортных (главных и второстепенных осей)* [9].

В рамках настоящего исследования принято считать:

- главная природная ось – крупная река – Ангара;
- второстепенные оси – малые реки – притоки Ангары – Ушаковка, Кудя, Балея, Китой и пр.;
- главная транспортная ось – железная дорога – Транссиб;
- второстепенные транспортные оси – главные автомобильные магистрали – Московский, Качугский, Байкальский, Култукский и Голоустненский тракты.

На пересечении главной транспортной и главной природной осей расположен крупный город Иркутск (рис. 5), ставший ядром агломерации – *главный узел расселения первого порядка* (радиус влияния – 60–100 км).

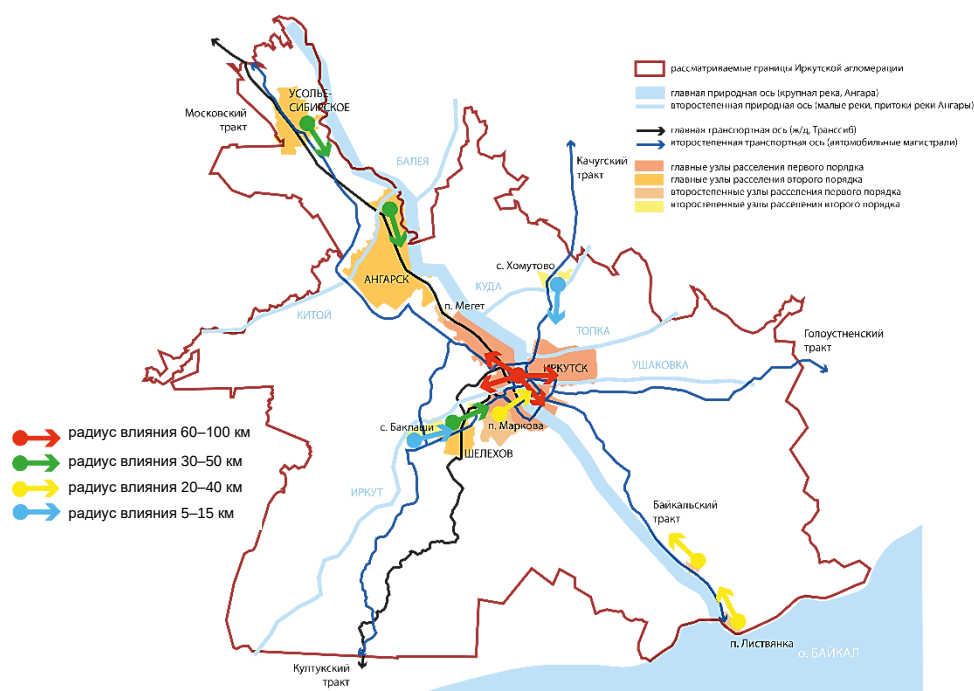


Рис. 5. Системы узлов расселения Иркутской агломерации и радиусы их влияния
Fig. 5. Settlements in Irkutsk agglomeration and radii of influence

Второстепенные узлы расселения первого порядка (радиус влияния – 30–50 км) сформировались на пересечении главных транспортных и второстепенных природных осей, к этим узлам следует отнести Ангарск, Усолье-Сибирское, Шелехов.

На пересечении второстепенных транспортных и главных природных осей расположены *главные узлы второго порядка* (например, п. Мегет) (радиус влияния – 20–40 км).

Второстепенные узлы второго порядка (например, п. Баклаши) (радиус влияния – 5–15 км) – на пересечении второстепенных транспортных и второстепенных природных осей [9].

Метод ландшафтообразности (А.Г. Большаков), при котором каждый уровень рельефа (вершина, склон, низина) обладает особым набором свойств, определяющих его эколого-градостроительное функционирование, способствует установлению границ функциональных зон с использованием естественного членения ландшафта долинами рек и транспортными направлениями (ж/д и автодорогами) [6, 9]. Соответственно образуются зональные пояса:

- 1) охраняемые побережья рек с местами отдыха;
- 2) сельскохозяйственные ландшафты (аграрные) с зонами расширенного градостроительного освоения (в т. ч. земли населённых пунктов, промышленной и транспортной инфраструктур);
- 3) особые зоны лесов (резервные, охранные и рекреационные).

В рамках исследования, при применении данного метода, ландшафтно-экологический каркас обретает определённую структуру и включает в себя: реки и их приречные территории в границах водоохранных зон – *ландшафтно-экологические оси*; особо охраняемые природные территории, расположенные между речными осями (природными) – *узлы ландшафтно-экологического каркаса*; пространство между природными осями и узлами ландшафтно-экологического каркаса – *аграрный ландшафт* (рис. 6) [9].

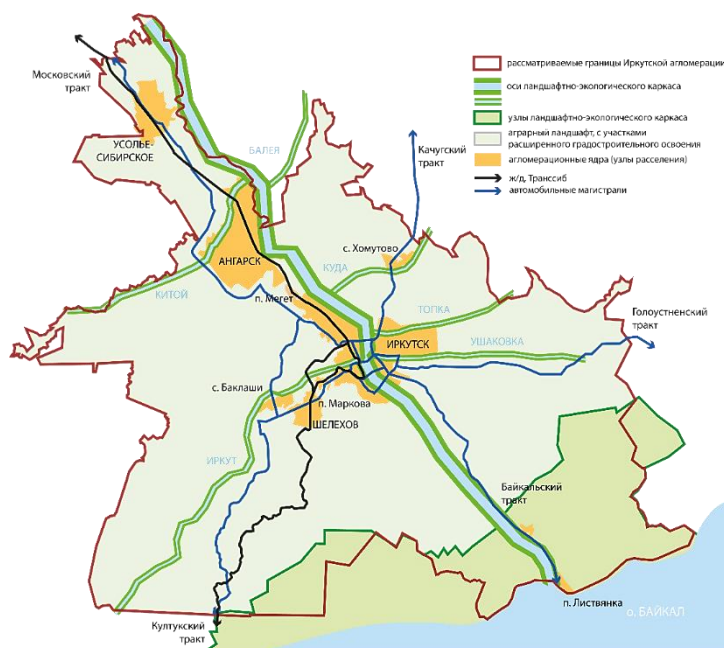


Рис. 6. Ландшафтно-экологический каркас Иркутской агломерации
Fig. 6. Landscape-ecological system of Irkutsk agglomeration

Учитывая анализ контекста исследования системы расселения вдоль Ангары, в частности, взаимосвязь ландшафтно-экологического и транспортного каркасов, можно выделить особенности её формирования и существующие проблемы:

– *природно-ресурсный аспект*: недостаточность учёта ландшафта местности при планировании и организации исследуемых территорий; близость к Байкалу – особой природной зоне – накладывает определённые ограничения и в то же время способствует концентрации населения в непосредственной близости к городу-ядру Иркутску (п. Листвянка) как к многофункциональному центру;

– *градостроительный аспект*: недостаточность градостроительного освоения пространства путём природосбережения (в частности, охраны водных объектов); разреженность сети расселения – населённые пункты тяготеют к двум основным осям расселения – Транссибу и р. Ангаре – чем дальше от осей расселения, тем менее плотно заселены территории прилегающих населённых пунктов [9];

– *транспортный аспект*: низкий уровень развития транспортной инфраструктуры – снижена доступность центров (главных и второстепенных); необходимость в новых автотранспортных скоростных направлениях; развивающийся авиационный транспорт;

– *социально-экономический аспект*: неравномерная конфигурация агломерации – концентрация населения в городе-ядре Иркутске, а промышленных центров – в городах-спутниках, что является причиной постоянной маятниковой миграции населения; необходимость в обновлении объектов социальной сферы.

Заключение

Городская агломерация – сложная градостроительная территориальная система, которая может быть трудной для понимания. При стратегическом планировании агломераций важно помнить о необходимости сведения разрастания городов к минимуму и обеспечении надлежащего распределения функций. Кроме того, следует учитывать множество различных свойств исследуемых территорий и понимать принципы их взаимовлияния.

В результате исследования были выявлены основные структурные элементы агломерации – типологически разные опорные узлы расселения, формирующие планировочные районы.

В связи с иерархической зависимостью структурных элементов агломерации было рассмотрено предложение о возможности влиять на векторы градостроительного развития системы расселения путём воздействия на некоторые опорные узлы – развитие в качестве точек роста.

Обоснование возможностей пространственного развития системы расселения Иркутской агломерации заключается в использовании потенциала градостроительного развития опорных узлов – *ключевых точек роста*:

– Иркутск имеет возможность развития в качестве многофункционального агломерационного центра: логистического, административно-делового и научно-образовательного направлений;

- Ангарск, Шелехов, Усолье-Сибирское – промышленные центры;
- п. Листвянка – рекреационно-туристический центр;
- п. Марково, с. Баклаши, с. Хомутово – рост дачно-садового строительства.

Как результат применения метода ландшафтосообразности в исследуемых границах Иркутской агломерации предлагается экологически сбалансированное пространственное развитие агломерации, исходя из естественной способности ландшафта к самовосстановлению.

Вершины водоразделов являются началом питания рек. В связи с этим предлагается выделить их в качестве ядер ландшафтно-экологического каркаса, кроме того, создать экологические коридоры между ядрами и природными осями в виде лесных массивов.

Низины рек представляют собой наибольшую экологическую значимость, что требует установления жёстких регламентов для ведения хозяйственной и градостроительной деятельности [9].

Таким образом, возможности развития Иркутской агломерации заключаются в использовании градостроительного потенциала данных опорных узлов. При этом степень их развития должна зависеть от экологических возможностей ландшафта к самовосстановлению.

В результате исследования были выявлены следующие аспекты проблематики исследуемых территорий: *природно-ресурсный, градостроительный, транспортный и социально-экономический*.

В качестве возможных путей решения проблем предложено:

- формирование приоритета ландшафтно-экологического каркаса: выделение осей по линиям рек в границах водоохранных зон; узлов (особо охраняемые природные территории); коридоров из сохраняемых и созданных лесных массивов. В пространстве между элементами ландшафтно-экологического каркаса выделить: земли сельскохозяйственного, промышленного и прочего использования, земли населённых пунктов;
- обеспечение городской среды зелёной инфраструктурой для устойчивого и пригодного для жизни развития городских районов [10];
- уточнение транспортно-инфраструктурного и промышленного каркасов с учётом ландшафтно-экологического каркаса, в т. ч. создание новых транспортных связей;
- организация систем полифункциональных общественных центров как точек притяжения людей, способствующих формированию их социально-экономического каркаса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ткаченко А.А. Ключевые понятия теории расселения: попытка переосмысления // Вестник московского университета. 2018. № 2. С. 10–15.
2. Особенности миграционной ситуации в Иркутской области. URL: <http://pandia.ru/text/78/353/959.php?ysclid=ldiknsnckq64464010> (дата обращения: 01.12.2022).
3. Перькова М.В. Формирование линейно-узловой структуры расселения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 120–125.
4. Matsler A.M., Miller T.R., Groffman P.M. The Eco-Techno Spectrum: Exploring Knowledge System's Challenges in Green Infrastructure Management // Urban Planning. 2021. V. 6. I. 1. P. 49–62.

5. Литвинова О.Г. Прибрежная система расселения реки Ангары в XVII–XXI вв. в контексте стратегического планирования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 98–116.
6. Большаков А.Г., Бобрышев Д.В. Идея перспективной структуры Иркутской агломерации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 8. С. 84–91.
7. Ангара, река. Ангара, река // ИРКИПЕДИЯ – портал Иркутской области: знания и новости. URL: <http://irkipedia.ru/NODE/2096> (дата обращения: 01.12.2022).
8. Современная история Иркутской области: 1992–2012 годы. История. Структура экономики Приангарья в 1985–2012 гг. // Современная история Иркутской области: 1992–2012. В 2 томах. Т. 1 / под ред. Ю.А. Зуляра. Иркутск, 2012. 279 с. URL: http://irkipedia.ru/content/istoriya_struktura_ekonomiki_priangarya_v_1985_2012_gg_sovremennaya_istoriya_irkutskoy?ysclid=l8o4vkbwsl347367514#new-simple-table-of-contents-2 (дата обращения: 01.12.2022).
9. Большаков А.Г., Скрыбин П.В. Опорные узлы как условие пространственного развития Байкало-Ангарского бассейна расселения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 2. С. 302–313.
10. Bush J., Ashley G., Foster B., Hall G. Integrating Green Infrastructure into Urban Planning: Developing Melbourne's Green Factor Tool // Urban Planning. 2021. V. 6. № 1. P. 20–31.

REFERENCE

1. Tkachenko A.A. Key concepts of settlement theory: An attempt to rethink. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. 2018; (2): 10–15. (In Russian)
2. Migration situation in the Irkutsk region. Available: <http://pandia.ru/text/78/353/959.php?ysclid=ldiknsnckq64464010> (accessed December 1, 2022). (In Russian)
3. Per'kova M.V. Formation of the linear-nodal settlement structure. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2017; (2): 120–125. (In Russian)
4. Matsler A.M., Miller T.R., Groffman P.M. The eco-techno spectrum: Exploring knowledge system's challenges in green infrastructure management. *Urban Planning*. 2021; 6 (1): 49–62.
5. Litvinova O.G. Settlement system in the Angara coastal area in the 17th–21st centuries in terms of strategic planning. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 23 (6): 98–116. (In Russian)
6. Bol'shakov A.G., Bobryshev D.V. The idea of a prospective structure for the Irkutsk agglomeration. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011; (8): 84–91. (In Russian)
7. The Angara river. Available: <http://irkipedia.ru/NODE/2096> (accessed December 1, 2022). (In Russian)
8. Modern history of the Irkutsk Region: 1992–2012. History. The economy structure of the Angara region in 1985–2012. Available: http://irkipedia.ru/content/istoriya_struktura_ekonomiki_priangarya_v_1985_2012_gg_sovremennaya_istoriya_irkutskoy?ysclid=l8o4vkbwsl347367514#new-simple-table-of-contents-2 (accessed December 1, 2022) (In Russian)
9. Bol'shakov A.G., Skryabin P.V. Pillar hubs as a condition for the spatial development of the Baikal-Angara settlement basin. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2021; 11 (2): 302–313. (In Russian)
10. Bush J., Ashley G., Foster B., Hall G. Integrating green infrastructure into urban planning: Developing Melbourne's green factor tool. *Urban Planning*. 2021; 6 (1): 20–31.

Сведения об авторах

Игнатенкова Вера Артемовна, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, ver357chik@yandex.ru

Байтенс Андрей Георгиевич, докт. архитектуры, чл.-корр. РААСН, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, avaytens@gmail.com

Authors Details

Vera A. Ignatenkova, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, 4, ver357chik@yandex.ru

Andrey G. Vaytens, DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, avaytens@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 11.02.2023
Одобрена после рецензирования 16.02.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 11.02.2023
Approved after review 16.02.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 23–29.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 23–29.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.424, 711.4.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-23-29

EDN: ZPLDDK

ОСНОВЫ СОХРАНЕНИЯ КУЛЬТУРНОГО ЛАНДШАФТА В СРЕДЕ ИСТОРИЧЕСКОГО СИБИРСКОГО ГОРОДА

Марина Валерьевна Скуднева

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

Аннотация. В статье рассматриваются основные периоды формирования культурного ландшафта в среде исторического сибирского города.

Актуальность исследования продиктована необходимостью выработки мероприятий по сохранению культурного ландшафта в структуре исторического города в условиях развивающегося строительства и реконструкции.

Методология исследования заключается в анализе и уточнении научных данных, полученных в ходе рассмотрения источников в области архитектуры и градостроительства Сибири. В процессе исследования использовались методы натурного обследования территории, функциональный и графоаналитический анализ.

В результате получены данные, позволяющие выделить основные периоды формирования и развития культурного ландшафта в среде исторического сибирского города во взаимодействии с элементами природного ландшафта.

В качестве основных выводов сформулированы базовые тезисы по сохранению культурного ландшафта в среде исторического сибирского города.

Ключевые слова: культурный ландшафт, городская среда, архитектурно-планировочная структура, исторический сибирский город

Для цитирования: Скуднева М.В. Основы сохранения культурного ландшафта в среде исторического сибирского города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 23–29. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-23-29. EDN: ZPLDDK

ORIGINAL ARTICLE

PRESERVATION OF CULTURAL LANDSCAPE IN THE HISTORICAL SIBERIAN CITY

Marina V. Skudneva

Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Novosibirsk, Russia

Abstract. Purpose: The aim of this work is to discuss the main periods of the cultural landscape formation in the historical Siberian city.

Design/methodology/approach: This research is required to preserve the cultural landscape in the historical city during its construction and reconstruction. The paper presents the data analysis and re-

finement obtained during the literature review in the field of architecture and urban planning in Siberia. Applied are the full-scale survey methods, functional and graph-analytic analyses.

Research findings: The data obtained allow identifying the main periods of the cultural landscape formation and development in the historical Siberian city interacting with natural landscape elements. The main theses are formulated for the preservation of the cultural landscape in the historical Siberian city.

Keywords: cultural landscape, urban environment, architectural and planning structure, historical Siberian city

For citation: Skudneva M.V. Preservation of cultural landscape in the historical Siberian city. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 23–29. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-23-29. EDN: ZPLDDK

Проблема сохранения исторического города как источника и хранителя многочисленных историко-культурных, технических и архитектурно-градостроительных ценностей становится ключевой задачей современного общества и играет важную роль в развитии российской культуры. Культурный ландшафт в истории зодчества является материальным отражением архитектурно-градостроительной культуры этносов в среде исторических периодов эволюции городов. Исторический сибирский город развивался в уникальных природных условиях, что отразилось на общей архитектурно-пространственной композиции первых оборонительных сооружений, возводимых на высоких живописных берегах рек (Тюмень, 1586 г., Тобольск, 1587 г., Томск, 1604 г.), и на своеобразии художественного облика городской среды [1].

Изучая разработанность заявленной темы, автор рассматривает научные подходы и направления, обращенные к проблеме культурного ландшафта. Одно из направлений затрагивает деятельность человека, тесно связанную с элементами природного ландшафта; другое – концентрируется на духовной компоненте; следующее, наиболее глубокое и широкое направление, освещает вопросы формирования культурного ландшафта как части среды исторического города, где сконцентрирована духовная и материальная основа, отразившаяся на эволюции исторического города.

Исследованием культурного ландшафта занимались немецкие ученые, географы, историки, этнографы, археологи. Среди них: Л. Фрабениус, Э. Нееф¹, П. Бургграф и другие, но общей концепции выработано не было. Основная часть этих работ обращалась к проблемам влияния человека на природный ландшафт в условиях расселения людей и использования природных ресурсов. Англо-американские теоретики, такие как Й.Ф. Туан, Д. Джексон, подходили к проблеме культурного ландшафта с разных сторон, соединяя представления о географии, философии, психологии. К.О. Зауэр² в своих трудах вводит понятие «культурный ландшафт» и рассматривает его как пространственное отражение накопленной эволюции культур в определенной местности, как своеобразную проекцию культур на природный ландшафт [9]. Необходимо отметить труд крупного американского ученого Д.О. Саймондса [7], в котором рассмат-

¹ Нееф Э. Теоретические основы ландшафтоведения. Москва: Прогресс, 1974. 220 с.

² Зауэр К.О. Морфология ландшафта = The Morphology of Landscape, 1925.

риваются различные объемно-пространственные решения ландшафтных элементов и композиций, поднимается целый ряд философских и эстетико-художественных проблем, с которыми сталкиваются архитекторы и проектировщики, занимающиеся вопросами проектирования городов и ландшафтов страны [7].

В конце XX в. советские ученые – географы, историки, этнографы МГУ – проявляют особый интерес к культурному ландшафту. На базе географического факультета МГУ (1993) проводится семинар, посвященный вопросам культурного ландшафта. Современные российские ученые В.Л. Каганский³, Ю.А. Веденин⁴, В.Н. Калущков⁵, С.М. Мягков и другие⁶ работают над этой проблемой сегодня.

Большой вклад в изучение и обобщение материалов, посвященных истории сибирского градостроительства и архитектуры XVI–XX вв., внесли сибирские ученые: Е.А. Ащепков, В.Ф. Болдырев, Л.Н. Вольская, В.Г. Горбачев, С.П. Заварихин, В.И. Кочедамов [3], А.И. Попов [4], Т.М. Степанская и др. Опираясь на изученные материалы, рассмотрим основные этапы формирования культурного ландшафта в среде исторического сибирского города.

Возникновение сибирских городов в XVI–XVII вв. началось с крепостей-острогов, возводимых на эстетически привлекательных и фортификационно оправданных участках рельефа, вдоль главных сухопутных и речных путей. Именно в этот период зарождался культурный ландшафт первых поселений. Грамотный подход к использованию главных элементов природного ландшафта стал особенностью не только древнерусского, но и сибирского градостроительства.

Топография местности влияла на своеобразие композиционно-планировочных решений каждого из городов Сибири, участвовала в формировании силуэта исторического города, придавала индивидуальные черты городской среде. Сложный рельеф играл важную роль при строительстве крепостей, монастырей и других фортификационных сооружений. Именно структура рельефа задавала основу всей архитектурно-пространственной и художественной композиции города [2].

Другим важным элементом ландшафта являлась река, которая в суровых природно-климатических условиях играла роль основной транспортной магистрали, при этом она становилась главной композиционной осью в архитектурно-планировочном решении сибирского города. Вид с водного пространства формировал первое впечатление о городе, его архитектурно-художественной выразительности у прибывающих по реке путешественников.

Культурно-градостроительные традиции, сложившиеся в определенный исторический период, предопределили отношение человека к окружающей природной среде. Формирование культурного ландшафта в процессе преобра-

³ Каганский В.Л. Культурный ландшафт и советское обитаемое пространство. Москва: Новое литературное обозрение, 2001. 576 с.

⁴ Веденин Ю.А. Культурный ландшафт как объект наследия / под ред. Ю.А. Веденина, М.Е. Кулешовой. Москва: Институт Наследия; Санкт-Петербург: Дмитрий Буланин, 2004. 620 с.

⁵ Калущков В.Н. Ландшафт в культурной географии. Москва: Новый хронограф, 2008. 317 с.

⁶ Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И., Лицкевич В.К. Город, архитектура, человек и климат / под ред. М.С. Мягкова. Москва: Архитектура-С, 2007. 344 с.

зования природной среды человеком в результате освоения сибирских территорий и дальнейшей градостроительной деятельности можно разделить на четыре периода.

Деревянные крепости, соборы, жилые и хозяйственные постройки являлись отражением традиционных приемов в русском зодчестве, переосмысленных и переработанных на основе самобытных традиций и сохранения специфики местной архитектуры в организации городского пространства. Модульный характер объемно-пространственной композиции сибирского города создавался на основе модуля, равного длине бревна (от 5,8 до 6 м) и его диаметру (от 0,2 до 0,8 м), из которого формировались основные элементы городской среды начала XVII в. Архитектурно-пространственная структура городов, как правило, была двухчастная и состояла из крепости-ostroга и посада. Основными элементами застройки являлись оборонительные крепостные стены с башнями, культовые сооружения, одноэтажные дома-клети, которые со временем в своем архитектурно-художественном облике отразили определенные этапы социально-экономического и культурного развития города.

На протяжении XVI–XVII вв. природный каркас являлся основой для формирования планировочной структуры сибирского города, а природное окружение было осязаемо и доступно в любой его точке, именно этот период становится начальным в формировании культурного ландшафта. В это время город имел компактные размеры, а главные элементы природного ландшафта (лесные массивы, реки, рельеф) являлись неотъемлемой частью морфологической структуры городской среды. Структура города, сложившаяся на основе открытых и закрытых пространств, была тесно связана с природой – возникает культурный ландшафт ещё *не урбанизированной среды*.

Размещение природно-антропогенных комплексов XVII в. на территориях с ярко выраженным рельефом повлияло на неординарность их архитектурно-градостроительных и художественных решений. Этот период характеризуется плотной корреляцией природного и антропогенного ландшафтов с особыми режимами функционирования (крепости, остроги, зимовья) и характерными морфотипами застройки, которые впоследствии исчезают.

Эволюция культурного ландшафта первой половины XVIII в. связана с появлением новых типов городов: города-крепости, города-заводы, города-торгово-административные центры, в которых развиваются специфические морфотипы застройки.

В первой половине XVIII в. в объемно-пространственной композиции города лидирующее положение по-прежнему занимали крупные архитектурные объекты XVII в. (крепости, монастыри), господствующие на высоких отметках рельефа и естественных террасах.

В среде города крепостные оборонительные сооружения, возведенные из вертикально установленных бревен и увенчанные доминирующими в пространстве башнями с шатровыми завершениями, являлись своеобразным модулем системы застройки. Культовые сооружения создавались из дерева и в структуре городов-крепостей играли роль пространственных ориентиров. В плане они имели простейшие конструктивные решения – клеть с пристройками в виде алтаря, притвора, трапезной. Особую выразительность жилой за-

стройке сибирских городов придавали простые геометрические формы (сруб, клеть), естественные фактуры и текстуры древесины, колористическое единство, использование декоративной резьбы и художественная роспись.

В середине XVIII в. происходит еще более активное освоение природного ландшафта, появляются новые морфотипы застройки, но эстетико-художественная композиция сибирского города сохраняет свои позиции (Тобольск, Томск, Омск) [3, 4]. Дальнейшее развитие культурного ландшафта относится к раннекапиталистическому периоду, когда сохраняется равновесие между основными элементами освоенного в результате антропогенной деятельности и природного ландшафтов.

Конец XVIII в. в градостроительстве связан с упразднением или преобразованием функций городов, созданием регулярных генеральных планов, что отразилось на дальнейшем развитии культурного ландшафта. Генеральные планы разрабатывались без учета морфологических особенностей местности и подвергались корректировке в процессе исполнения, т. к. их разработчики не всегда имели возможность выезжать на место и выполнять натурные обследования проектируемых территорий. Лесные массивы, ранее окружавшие Томск, Барнаул, Змеиногорск, подверглись уничтожению в результате антропогенной деятельности, нередко связанной с развитием промышленного производства и расширением территориальных границ. В таких условиях формировался культурный ландшафт *слабоурбанизированной среды*. Весь XVIII в. и начало XIX в. связаны с активным экономическим подъемом в городах, когда в процессе градостроительной деятельности превосходство человека над природой и подчинение ее утилитарным требованиям отражает новые реалии времени.

Разделение города на жилые, промышленные, торговые и другие зоны вносит коррективы в городскую среду, наполняя её новыми типами и системами застройки. Так, на основе сереброплавильного завода в Барнауле происходит формирование двух крепостей, окружавших соответственно зоны жилой и промышленной застройки [10]. Появляются новые типы зданий и сооружений, большое распространение получает каменное (кирпичное) строительство.

Второй период – эволюция культурного ландшафта в *слабоурбанизированной среде*. В этот период меняется образ жизни и взаимоотношение человека с окружающим природным пространством, происходит трансформация всего уклада жизни [8]. Значительные изменения наблюдаются в городской среде, и они связаны с формированием локальных участков общественной и жилой деревянной застройки, гармонично сосуществующей с природным окружением благодаря единой модульной системе.

Особое внимание следует уделить рассмотрению третьего периода в формировании культурного ландшафта (XIX – начало XX в.), который можно разделить на два этапа: первый – XIX в.; второй – конец XIX – начало XX в. Происходит активный рост городской территории, возникают новые функциональные зоны [8]. Развитие мануфактурного производства привело к разрастанию мест размещения производства в структуре города, соответственно развитие городов требовало нового подхода к формированию структуры, в основе которой было четкое функциональное зонирование с включением общественно-бытовой и культурно-образовательной функций, а также развитие транспортно-

пешеходной инфраструктуры. Основной «проблемой» сибирского города этого периода стала его живописная планировочная структура, подчиняющаяся ландшафтно-топографическим особенностям местности, которую в связи с ростом городов необходимо было пересматривать и структурировать.

Природное окружение качественно менялось, интегрируя и фрагментарно включаясь в городскую среду. Разрастаясь, центр города постепенно вытеснял наиболее уязвимые элементы природного ландшафта – лесные массивы. В этот период складывается культурный ландшафт *урбанизированной среды* в крупных и больших городах и сохраняется культурный ландшафт *слабоурбанизированной среды* в малых городах (Колывань, Змеиногорск).

Четвертым периодом в развитии культурного ландшафта становится XX – начало XXI в., когда стремительно меняется экономическая и социально-политическая ситуации, эволюционирует научно-технический прогресс, происходит переосмысление значимости природного окружения в жизни человека и качественно меняется городская среда. Это советский и постсоветский этапы эволюции культурного ландшафта, когда создаётся *высокоурбанизированная среда* по российским стандартам – в крупнейших городах, *урбанизированная среда* – в крупных. Вместе с тем *слабоурбанизированная среда* по-прежнему сохраняет свои лидирующие позиции в малых городах. В среде крупных городов Сибири (Томск, Омск и др.) происходят значительные изменения, связанные с внедрением современной застройки в наиболее ценную градостроительную ткань исторического ядра [5].

В конце XX в. в исторических сибирских городах считалось возможным сохранять лишь наиболее ценные памятники и ансамбли и не уделялось должного внимания рядовой, фоновой застройке, расположенной в непосредственной близости от памятников архитектуры. Как правило, рядовая застройка подвергалась сносу или реконструкции, а на ее месте возводились новые многоэтажные жилые здания, объекты научно-промышленного и общественного назначения, не всегда стилистически и эстетически вписывающиеся в историческую ткань города [6].

В основе сохранения культурного ландшафта, являющегося неотъемлемой частью среды города, должен быть заложен принцип преемственности и пролонгации традиций в объемно-пространственной и архитектурно-планировочной организации городского пространства. Этот принцип может быть достигнут путем: музеефикации ценных фрагментов застройки; совершенствования транспортно-пешеходной инфраструктуры; развития новых функциональных зон; модернизации и оздоровления городской среды.

Выполнение поставленных задач послужит основой для развития и сохранения историко-архитектурного наследия исторических сибирских городов. Создание сомасштабных, гармоничных ансамблей в системе исторических кварталов, площадей и улиц станет результатом бережного отношения последующих поколений к историко-культурному и архитектурно-градостроительному наследию, созидательному творчеству своих предшественников при выполнении и реализации проектов реконструкции памятников архитектуры и строительства современных объектов в среде исторического города.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бунин А.В. История градостроительного искусства. Т. 1. Москва, 1953. 495 с.
2. Вольская Л.Н. Архитектурно-градостроительное наследие Сибири и основы его сохранения при реконструкции : специальность 18.00.01 Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора архитектуры. Москва, 1997. 42 с.
3. Кочедамов В.И. Омск. Как рос и строился город / переплет и тит. лист худож. Н.И. Сазонова. Омск : Омское книжное изд-во, 1960. 111 с.
4. Попов А.И. Томск. Архитектура городов СССР. Москва : Госстройиздат, 1959. 136 с.
5. Пруцын О.И., Рымашевский Б., Борусевич В. Архитектурно-историческая среда. Москва : Стройиздат, 1990. 408 с.
6. Ранинский Ю.В. Суздаль – туристический центр. Москва : Стройиздат, 1981. 279 с.
7. Саймондс Д.О. Ландшафт и архитектура. Москва : Изд-во литературы по строительству. 1965. 193 с.
8. Скуднева М.В. Культурный ландшафт исторического города Сибири : специальность 18.00.01 Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектуры. Новосибирск, 2005. 26 с.
9. Schein R.H. The place of landscape: a conceptual framework for interpreting an American scene // Annals of the Association of American Geographers. 1997. V. 87. № 4, P. 660–680.
10. Степанская Т.М. Архитектура Барнаула. Барнаул : Алт. кн. изд-во, 1974. 240 с.

REFERENCES

1. Bunin A.V. History of urban art, Vol. 1. Moscow, 1953. 495 p. (In Russian)
2. Volskaya L.N. Architectural and urban heritage of Siberia and basics of its preservation during reconstruction. DSc Abstract. Moscow, 1997. 42 p. (In Russian)
3. Kochedamov V.I. How the city of Omsk grew and was built. Omsk, 1960. 111 p. (In Russian)
4. Popov A.I. Tomsk. Architecture of cities of the USSR. Moscow: Gosstroyizdat, 1959. 136 p. (In Russian)
5. Prutsyn O.I., Rymashevsky B., Borusevich V. Architectural and historical environment. Moscow: Sroyizdat, 1990. 408 p. (In Russian)
6. Raninsky Yu.V. Suzdal as a tourist center. Moscow: Sroyizdat, 1981. 279 p. (In Russian)
7. Symonds D.O. Landscape and architecture. Moscow, 1965. 193 p. (In Russian)
8. Skudneva M.V. Cultural landscape of historical city of Siberia. PhD Abstract. Novosibirsk, 2005. 26 p. (In Russian)
9. Schein R.H. The place of landscape: A conceptual framework for interpreting an American scene. *Annals of the Association of American Geographers*. 1997; 87 (4): 660–680.
10. Stepanская T.M. Architecture of Barnaul. Barnaul, 1974. 240 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Скуднева Марина Валерьевна, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, 630099, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, Skudneva74@mail.ru

Author Details

Marina V. Skudneva, PhD, A/Professor, Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, Skudneva74@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.01.2023
Одобрена после рецензирования 07.05.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 31.01.2023
Approved after review 07.05.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 30–38.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 30–38.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.027.1:711.73(470.23-25)

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38

EDN: ZBFYJK

СОЗДАНИЕ КООРДИНИРОВАННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ТРАНСПОРТНОМ ПЛАНИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Евгений Александрович Шестеров

Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет, г Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность исследования определена необходимостью совершенствования нормативно-правовой, методической и организационной базы в области координации функционирования современных транспортных систем на различных стадиях территориально-транспортного планирования городских территорий.

Целью исследования является разработка основных аспектов координации различных видов городского пассажирского транспорта с учетом современных тенденций формирования транспортной инфраструктуры городов. Разработанные на основе обследований на транспортной сети Санкт-Петербурга нормативы затрат времени населения на поездки, скорости передвижения пассажиров, а также затрат времени на передвижение в транспортно-пересадочных узлах позволяют выбрать направление транспортных связей в системе городского пассажирского транспорта Санкт-Петербурга, требующих оптимизации.

Практическое применение методики оценки уровня взаимодействия различных видов городского пассажирского транспорта заключается в том, что она позволяет рационально распределить объемы перевозок между различными видами общественного пассажирского транспорта. Результаты хронометражных обследований в транспортно-пересадочных узлах и визуальных обследований интенсивности движения транспорта и пешеходов на пересечениях магистральных улиц позволяют выявлять узлы, требующие первоочередного совершенствования по снижению затрат времени на пересадку, удобству пересадки и повышению пропускной способности узлов.

Ключевые слова: транспортная система, территориально-транспортное планирование, городские территории, городской пассажирский транспорт, транспортно-пересадочные узлы, пассажироперевозки, затраты времени на передвижение, пропускная способность

Для цитирования: Шестеров Е.А. Создание координированной транспортной системы при территориально-транспортном планировании развития городских территорий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 30–38. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38. EDN: ZBFYJK

ORIGINAL ARTICLE

**COORDINATED TRANSPORT SYSTEM IN TERRITORY
AND TRANSPORTATION DEVELOPMENT IN URBAN AREAS****Evgenii A. Shesterov***Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. Purpose: The development of the main aspects of coordinating various types of urban transport taking into account current trends in the formation the transport infrastructure.

Methodology/approach: Stop-watch reading, visual examination of the road and pedestrian traffic.

Research findings: Identified were placed that require reducing the time of transfer in transport, improving its convenience and increasing the traffic potential.

Practical implications: The proposed methodology to assess the interaction between different types of urban transport implies a rational traffic distribution.

Value: The paper determines the need to improve regulatory, methodological and organizational framework in the transport system coordination at various stages of territory and transport planning in urban areas.

Keywords: transport system, territory and transportation development, urban area, urban passenger transport, transport hub, time consumption, traffic potential

For citation: Shesterov E.A. Coordinated transport system in territory and transportation development in urban areas. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 30–38. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38. EDN: ZBFYJK

Введение

Актуальность исследования определена необходимостью совершенствования нормативно-правовой, методической и организационной базы в области координации функционирования современных транспортных систем на различных стадиях территориального планирования городских территорий.

Разработаны нормативы затрат времени населения, скорости передвижения пассажиров, а также затрат времени на передвижение в транспортно-пересадочных узлах (ТПУ). Они позволяют выбрать направление транспортных связей в системе городского пассажирского транспорта Санкт-Петербурга, требующих оптимизации. Практическое применение методики оценки уровня взаимодействия различных видов городского пассажирского транспорта (ГПТ) позволяет рационально распределить объемы пассажироперевозок между различными видами общественного пассажирского транспорта и индивидуального автомобильного транспорта. Целью исследования является разработка основных аспектов координации различных видов ГПТ с учетом современных тенденций формирования транспортной инфраструктуры городов.

Результаты

В настоящее время правовой основой территориального планирования развития городских территорий является Градостроительный кодекс Российской Федерации, определяющий документацию и последовательность терри-

ториального планирования – от схемы территориального планирования к генеральному плану города, правилам землепользования и застройки, проектам планировки отдельных районов.

Следует отметить, что каждому виду документа территориального планирования в качестве объекта планирования соответствует своя форма собственности. Это означает, что все уровни документов являются юридически самостоятельными, но взаимосвязанными друг с другом через механизмы согласования общественных и частных интересов. На практике это является важным обстоятельством, позволяющим органам власти любого уровня (федерального, регионального, местного) самостоятельно разрабатывать, согласовывать и утверждать требующиеся в соответствии с действующим законодательством документы территориального и транспортного планирования. Однако, учитывая, что основными принципами территориального планирования являются системность и комплексность, юридическая самостоятельность предполагает содержательную взаимосвязь документов территориального планирования различных уровней.

Целью территориального и транспортного планирования является определение в соответствующих документах назначения городских территорий исходя из совокупности социальных, экономических, экологических и иных факторов в целях обеспечения устойчивого развития территорий, развития инженерной, транспортной и социальной инфраструктур с учетом баланса интересов граждан и их объединений Российской Федерации, субъектов Российской Федерации и муниципальных образований.

Территориальному планированию должно предшествовать стратегическое планирование, основанное на определении общих направлений, целей и задач развития городских территорий. Поставленные при стратегическом планировании цели в дальнейшем проецируются на конкретную территорию, имеющую сложившуюся структуру землепользования, инженерную, транспортную и социальную инфраструктуры и иные индивидуальные особенности [1, 2].

Проведенные исследования показали, что в условиях рыночной экономики основным документом управления устойчивым развитием городских территорий является Стратегический план как основа для разработки генерального плана, представляющий собой инструмент консолидации усилий всех заинтересованных сторон, определяющий основные параметры социально-экономического развития города [3].

В России до недавнего времени при территориальном планировании нередко применялся отраслевой подход, что позволяло органам государственной власти и местного самоуправления принимать документы территориального планирования, направленные на решение отдельных краткосрочных экономических задач в ущерб задачам комплексного устойчивого развития городских территорий.

Для любого города наличие Стратегического и генерального планов обеспечивает возможность привлечения стратегических инвесторов, доступ к государственным инвестиционным инструментам по развитию инженерной, транспортной и социальной инфраструктуры.

Территориально-транспортное планирование является частью градостроительной деятельности, и необходимость его развития обусловлена следующими предпосылками развития транспортных систем крупнейших городов:

– явным отставанием уровня развития транспортных систем крупнейших городов от потребностей населения. Транспортные проблемы сдерживают развитие городских территорий, снижают их инвестиционную привлекательность. Низкий уровень безопасности дорожного движения становится национальной проблемой;

– проблемой привлечения значительных инвестиций в модернизацию транспортных систем и длительным сроком окупаемости капитальных вложений;

– невозможностью решения транспортных проблем при введении в эксплуатацию одного-двух объектов в отрыве от объектов, находящихся в ведении других уровней власти.

Объектом территориально-транспортного планирования является городская транспортная система, включающая улицы и дороги, другие объекты транспортной инфраструктуры местного значения, а также объекты транспортной инфраструктуры регионального и федерального значения, находящиеся в границах территории городского поселения, за исключением объектов, не имеющих связей с местной сетью (проходящих транзитом), а также жизненно важные элементы транспортных сетей поселений, находящиеся на прилегающих территориях (объездные дороги и их элементы, аэропорты и т. д.).

Основной целью территориально-транспортного планирования является рациональное распределение ресурсов (финансовых, материальных, трудовых, технических, информационных и др.), направленных на развитие территориальной транспортной системы городского поселения, с учетом баланса интересов органов государственной власти и местного самоуправления, бизнес-структур и населения.

Анализ функционирования транспортных систем крупных и крупнейших городов РФ выявляет неудовлетворительные условия дорожного движения и пассажирских перевозок, особенно в часы пик, более того, показывает явную тенденцию к их ухудшению. В настоящее время средневзвешенные затраты времени на передвижение в крупнейших городах России составляют более 50 мин, а на направлениях между удаленными районами крупнейшего города – 90 и более минут, что в 1,5–2 раза превышает современные нормы. По оценкам экспертов, увеличение времени передвижения на работу всего лишь на 10 мин против установленной нормы (не свыше 30 мин) приводит к снижению производительности труда на 2,5–4 % и, следовательно, к народнохозяйственным издержкам.

Для перелома этой тенденции необходимы немедленные перемены в транспортной политике. Следует согласиться с исследованиями В.Р. Вучика, в которых отмечается, что российские города фактически не используют передовой опыт в сфере транспортного планирования и организации функционирования транспортных систем, накопленный во многих городах мира за последние полвека. Результатом этого становится повторение многих типичных ошибок из мировой практики прошлых лет, с которыми сталкиваются сегодня города России.

В работах В.Р. Вучика [4, 5] даны рациональные общие рекомендации для российских городов в области создания «рациональной транспортной политики».

В первую очередь это создание новых структур и групп экспертов по транспорту в городских администрациях для разработки стратегии развития в области территориально-транспортного планирования и координации всего круга вопросов, связанных с развитием и функционированием транспортной системы города (агломерации). Это и необходимость налаживания четкой координации между планированием землепользования и развитием транспортной системы, поскольку ведение нового строительства без адекватного наращивания транспортного ресурса всегда приводит к заторам. Это и создание сбалансированной транспортной системы, в которой должна быть четко определена роль и место улично-дорожной сети (УДС) и автомобильного трафика, общественного транспорта, пешеходного и других видов сообщений [6]. Это и введение жесткого регулируемого парковочного режима применительно к каждому классу УДС. Это и вопрос о введении платы в крупнейших городах за пользование отдельными участками УДС в центральных районах. Это и необходимость вернуться к централизованной системе управления наземным общественным транспортом (как это было в Ленинграде в 70–80-х гг. прошлого столетия, когда взаимодействие между различными видами городского пассажирского транспорта осуществлял Отдел координации при Ленгорисполкоме) и в первую очередь наладить регулярную работу магистральных маршрутов, устранив хаотичную конкуренцию за пассажира, особенно в отношении коммерческих перевозок.

Для крупнейших городов должна быть принята концепция дальнейшего развития в системе УДС сети скоростных дорог с обязательным контролируемым доступом и сети скоростного рельсового транспорта. В Санкт-Петербурге такая Программа разработана и утверждена Постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 30.06.2014 г. № 552: «Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга 2017–2038 гг. (перспектива до 2048 г.)». Главная задача на сегодняшний день – практическая реализация этой программы. Решать ее нужно комплексно с учетом взвешенного взаимодействия всей транспортной системы города: уличного пассажирского транспорта, метрополитена, скоростного легкорельсового транспорта, внутригородских участков железных дорог, индивидуального автомобильного транспорта.

Формы и методы взаимодействия и координации различных видов транспорта, как известно, реализуются в нескольких областях (сферах): технической, технологической, организационной, экономической и правовой. При этом координация работы различных видов городского пассажирского транспорта должна предусматривать в первую очередь следующие основные аспекты [9]:

- рациональное распределение объема пассажироперевозок между различными видами как наземного ГПТ (автобус, троллейбус, обычный трамвай), так и скоростного ГПТ (головные участки железной дороги, метрополитен, скоростной трамвай, иначе ЛРТ – легкий рельсовый транспорт) с учетом и работы индивидуального легкового транспорта в пассажироперевозках;
- рациональное построение координированной маршрутной системы;
- рациональное размещение транспортно-пересадочных узлов в планировочной структуре города;

– рациональное планировочное решение каждого ТПУ. Мультиmodalный пересадочный узел – вариант решения узлов в крупнейших городах. Он базируется на трех принципиальных положениях: узел соединяет в себе несколько видов транспорта, он может быть использован в любой градостроительной ситуации и создает комфортные условия для перемещения и размещения ожидающих пассажиров.

Вопросами изучения пересадочных узлов в нашей стране занимались многие исследователи [7, 8]. В комплексе пересадочные узлы и их оценка авторами не рассматривались.

Согласно исследованиям автора настоящей статьи в крупнейших городах может быть выделено четыре основных класса пересадочных узлов по признаку различных сочетаний видов ГПТ [9–13]:

- 1) пересадочные узлы между отдельными видами скоростного рельсового транспорта (СРТ): метрополитен, скоростной трамвай (легкорельсовый транспорт), внутригородские участки железной дороги;
- 2) пересадочные узлы на стыке систем скоростного рельсового и видов уличного пассажирского транспорта (УПТ);
- 3) пересадочные узлы между отдельными видами УПТ: трамвай, троллейбус, автобус;
- 4) комплексные (мультиmodalные) пересадочные узлы: 2 и более видов СРТ + УПТ.

В зависимости от взаимного размещения стыкуемых транспортных линий, ТПУ можно разделить на следующие типы:

- а) раздельные в одном уровне (устройства взаимодействующих видов транспорта расположены в одном уровне отдельно друг от друга);
- б) раздельные в разных уровнях (взаимодействующие транспортные линии проходят в разных уровнях, соединенных лестницами, пандусами, эскалаторами);
- в) совмещенные (наличие общего пересадочного устройства в одном уровне с организацией пересадки с одной посадочной площадки или на одной посадочной платформе по принципу «дверь в дверь»).

Исследования автора с учетом проведенных под его руководством многочисленных хронометражных и визуальных обследований в ТПУ Ленинграда, Москвы и Киева в 80–90-х гг. прошлого столетия на пересечениях магистральных улиц Санкт-Петербурга в 2000-х гг. позволили разработать оптимальные значения затрат времени на подходы при пересадке в ТПУ и оценить пропускную способность узлов. Для первого класса ТПУ оптимальные затраты времени на подходы при пересадке в зависимости от типов узлов рекомендованы для наземных станций метрополитена от 1,0 до 3,0 мин. Для подземных станций метрополитена глубокого заложения с учетом эскалаторного времени – от 5,5 до 7,0 мин, для станций мелкого заложения – от 3,5 до 5,0 мин. Для второго класса ТПУ для подземных станций метрополитена глубокого заложения с учетом эскалаторного времени – от 2,5 до 5,5 мин, для станций мелкого заложения – от 2,5 до 4,0 мин. Для третьего класса узлов оптимальные затраты времени на подходы при пересадке в зависимости от типов узлов рекомендованы от 1,0 до 2,5 мин.

Такая градация, в отличие от рекомендованного в своде правил «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» времени передвижения пассажиров на пересадку в пересадочных узлах, независимо от величины расчетных пассажиропотоков, не более 5 мин (без учета времени ожидания транспорта), позволяет более точно определить одну из составляющих общих затрат времени на передвижение пассажиров и таким образом объективно оценить уровень транспортного обслуживания населения. Сокращение накладных затрат времени на передвижение (затрат времени на пешеходные подходы и отходы, затраты времени на ожидание транспорта и затраты времени на пересадки при пересадочных сообщениях) невозможно осуществить без координированной работы всех видов городского пассажирского транспорта в транспортной системе любого города.

Немаловажное значение при решении вопросов координации работы различных видов городского пассажирского транспорта и повышения качества транспортного обслуживания населения должно уделяться вопросам безопасности движения транспорта и пешеходов, решение которых требует проведения комплекса мероприятий в области организации движения и обустройства элементов улиц и дорог [14, 15].

Заключение

Территориально-транспортное планирование как часть градостроительной деятельности в контексте его развития требует комплексного подхода при разработке транспортных разделов схем территориального планирования, генеральных планов городов, правил землепользования и застройки, проектов планировки отдельных районов. В основе комплексного подхода лежат в том числе формы и методы взаимодействия и координации различных видов транспорта, основные аспекты которых изложены в настоящей статье.

Разработка технологии взаимодействия различных видов ГПТ направлена в первую очередь на создание «рациональной транспортной политики» и, как конечный результат этой политики, – на повышение качества транспортного обслуживания населения. Решение основной задачи ГПТ – перевозка пассажиров при минимально возможной затрате времени на передвижения в условиях максимального комфорта является квинтэссенцией любой градостроительной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Sherbina E.V., Danilina N.V., Vlasov D.N.* City planning issues for sustainable development // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. V. 10. № 22. P. 43131–43138.
2. *Ahmadi F., Toghyani S.* The Role of Urban Planning in Achieving Sustainable Urban Development. 2011. URL: http://research.iaun.ac.ir/pd/ahmadi.f/pdfs/PaperM_8634.pdf (дата обращения: 04.01.2019).
3. *Митягин С.Д.* Градостроительство. Эпоха перемен. Санкт-Петербург : Зодчий, 2016. 280 с.
4. *Вучик В.Р.* Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина ; под научн. ред. М. Блинкина. Москва : Издательский дом «Территория будущего», 2011. 576 с. (Серия «Университетская библиотека Александра Погорельского»).
5. *Vuchik V.R.* Urban transit system and technology. John Wiley and sons. Inc., 2007. 624 p.
6. *Агасьянц А.А.* Развитие сети автомобильных магистралей в крупнейших городах. Транспортно-градостроительные проблемы. Москва : Изд-во АСВ, 2010. 248 с.

7. *Азаренкова З.В.* Транспортно-пересадочные узлы в планировке городов. Москва : ОАО «Типография «Новости», 2011. 96 с.
8. *Власов Д.Н.* Транспортно-пересадочные узлы. 2-е изд. Москва : Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2017. 192 с.
9. *Шестеров Е.А.* Совершенствование транспортной сети на основе методики оценки уровня взаимодействия системы городского пассажирского транспорта // Проблемы комплексного проектирования городской среды : материалы зональной конф. Пенза : ПДНТИ, 1987. С. 87–90.
10. *Шестеров Е.А.* К методике оценки работы транспортных пересадочных узлов крупного города // Исследования по функциональным, физико-техническим и эстетическим проблемам архитектуры / под ред. В.С. Гвоздякова, А.Н. Овсянникова, 1989. С. 74–77.
11. *Шестеров Е.А.* Сравнительная оценка функционирования транспортно-пересадочных узлов в транспортной системе Санкт-Петербурга (на примере крупных пересадочных узлов в Московском районе) // Материалы 63-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Санкт-Петербург, 2006. С. 65–68.
12. *Kopylova T., Mikhailov A., Shestеров E.A.* Level-of-Service concept regarding intermodal hubs of urban public passenger transport // *Transportation Research Procedia*. 2018. 36. P. 303–307.
13. *Shestеров E., Mikhailov A.* Accident Rates at Signalized Intersections // *Transportation Research Procedia*. 2017. 20. P. 613–617.
14. *Шестеров Е.А.* Анализ пропускной способности Московского проспекта на пересечениях с магистралями общегородского значения // II Междунар. науч.-практич. конф. : сб. трудов. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2017. С. 311–316.
15. *Yakimov M.R.* Urban Transport Systems Efficiency and Safety // *Transportation Research Procedia*. 2017. V. 20. P. 702–708.

REFERENCES

1. *Sherbina E.V., Danilina N.V., Vlasov D.N.* City planning issues for sustainable development. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10 (22): 43131–43138.
2. *Ahmadi F., Toghyani S.* The role of urban planning in achieving sustainable urban development. 2011. Available: http://research.iaun.ac.ir/pd/ahmadi.f/pdfs/PaperM_8634.pdf (accessed on 04.01.2019).
3. *Mityagin S.D.* Urban planning. The age of change. Saint-Petersburg: Zodchii, 2016. 280 p. (In Russian)
4. *Vuchik V.R.* Transport in cities convenient for living. M. Blinkin, ed., Moscow: Territoriya budushchego, 2011. 576 p. (In Russian)
5. *Vuchik V.R.* Urban transit system and technology. John Wiley and Sons. Inc., 2007. 624 p.
6. *Agasyants A.A.* Development of motorway network in major cities. Transport and town planning problems. Moscow: ASV, 2010. 248 p. (In Russian)
7. *Azarenkova Z.V.* Transport-transfer hubs in cities planning. Moscow: Novosti, 2011. 96 p. (In Russian)
8. *Vlasov D.N.* Transport-transfer hubs, 2nd ed. Moscow, 2017. 192 p. (In Russian)
9. *Shestеров E.A.* Improvement of transport network on the basis of evaluation methodology of urban passenger transport system. In: *Proc. Zonal Conf. 'Problems of Integrated Design of Urban Environment'*, Penza, 1987. Pp. 87–90. (In Russian)
10. *Shestеров E.A.* Evaluation methods of transport hubs in a big city. In: Research on functional, physical and technical and aesthetic problems of architecture. V.S. Gvozdyakov and A.N. Ovsyannikov, eds., 1989. Pp. 74–77. (In Russian)
11. *Shestеров E.A.* Comparative assessment of transport hub functioning in St.-Petersburg (by the example of large transfer hubs in the Moscow district). In: *Proc. 63rd Sci. Conf. of Professors, Teachers, Researchers, Engineers and Graduate Students*. Saint-Petersburg, 2006. Pp. 65–68. (In Russian)
12. *Kopylova T., Mikhailov A., Shestеров E.A.* Level-of-service concept regarding intermodal hubs of urban public transport. *Transportation Research Procedia*. 2018; (36): 303–307.

13. *Shesterov E., Mikhailov A.* Accident rates at signalized intersections. *Transportation Research Procedia*. 2017; (20): 613–617.
14. *Shesterov E.A.* Analysis of traffic capacity of Moscow avenue at the intersection with important highways. In: *Proc. 2nd Int. Conf.* Saint-Petersburg, 2017. Pp. 311–316. (In Russian)
15. *Yakimov M.R.* Urban transport systems efficiency and safety. *Transportation Research Procedia*. 2017; (20): 702–708.

Сведения об авторе

Шестеров Евгений Александрович, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, eashest@rambler.ru

Author Details

Evgenii A. Shesterov, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, eashest@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12.04.2023
Одобрена после рецензирования 10.05.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 12.04.2023
Approved after review 10.05.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 39–53.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 39–53.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 712.3(510)

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-39-53

EDN: YSYCUK

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ СХЕМ И ИНСТРУМЕНТОВ ТЕОРИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СИНТАКСИСА

Дмитрий Сергеевич Целуйко, Арина Романовна Кирпо

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Аннотация. В статье проанализированы три проекта объектов общественного питания (кафе на 75 человек), выполненных по идентичному техническому заданию, при помощи инструментов пространственного синтаксиса. В первой части дана общая характеристика работы и обзор литературы. Рассмотрены различные подходы к исследованию пространства как целостной структуры. Исследованы работы ученых по данной тематике, как отечественных, так и зарубежных, на основании чего выбран один из точных математических инструментов для анализа планировочной структуры. В работе приведены критерии, по которым будет оцениваться эффективность каждой планировочной структуры. Описан процесс создания графоаналитической модели каждого из примеров. В рамках синтаксического анализа основными величинами являются энтропия и интеграция, также приведен ступенчатый анализ глубины – j-граф. После описания результатов анализа каждого из объектов дано заключение.

Актуальность исследования состоит в разработке нового подхода к анализу планировочных структур с помощью инструментов пространственного синтаксиса и в выявлении наиболее структурированного пространства на основе результатов исследования.

Цель работы: выявление сходств и различий среди трех планировок, созданных по одинаковому техническому заданию, для изучения нюансов и особенностей проектирования, которые могут быть недоступны проектировщику без использования синтаксического анализа.

Методы: анализ источников и литературы по теме исследования; метод графоаналитического анализа; метод компьютерного моделирования; метод синтаксического анализа.

Результаты: подробно разобран метод синтаксического анализа с подбором инструментов и пространственных величин, подходящих именно для данных объектов. Описаны критерии и условия оценки эффективности планировочной структуры. Обозначен дальнейший вектор работ и показан потенциал синтаксического анализа как метода предпроектной оценки работы.

Ключевые слова: архитектура, кафе, планировочная структура, анализ, пространство, граф, графоаналитический метод, Rhinoceros, Grasshopper

Для цитирования: Целуйко Д.С., Кирпо А.Р. Исследование характеристик планировочной структуры с использованием графоаналитических схем и инструментов теории пространственного синтаксиса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 39–53. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-39-53. EDN: YSYCUK

ORIGINAL ARTICLE

GRAPH-ANALYTIC MODELS AND SPACE SYNTAX TOOLS FOR PLANNING STRUCTURE CHARACTERIZATION**Dmitrii S. Tseluiko, Arina R. Kirpo***Pacific National University, Khabarovsk, Russia*

Abstract. Purpose: The aim of the work is to identify the similarity and difference between three layouts created by the same technical specifications in order to study the design parameters, which may be inaccessible to the designer without the syntactic analysis.

Methodology/approach: Different approaches are considered in relation to space as an integral structure. Entropy and integration are used for the syntactic analysis, and j-graph is used for the stepwise depth analysis. Investigated are different works, and the precise mathematical tools for the analysis of the planning structure are chosen. The paper proposes the criteria evaluation of the effectiveness of each planning structure. A graph-analytic model is created.

Research findings: The method of parsing is explained in detail, with the selection of tools and spatial values that are appropriate for the objects in question. Criteria and conditions for evaluating the planning structure effectiveness are described. A further vector of work is outlined and the potential of syntactic analysis as a method of pre-project evaluation of work is shown.

Originality: The paper proposes the criteria evaluation of the planning structure effectiveness. A graph-analytic model is created.

Keywords: architecture, planning structure, analysis, space, graph, graph-analytic model, Rhinoceros, Grasshopper

For citation: Tseluiko D.S., Kirpo A.R. Graph-analytic models and space syntax tools for planning structure characterization. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 39–53. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-39-53. EDN: YSYCUK

Введение

Для проектирования зданий общественного питания в Российской Федерации существует множество нормативных документов, описывающих конструктивные, пожарные, инженерные и прочие части здания. Но практически нигде не сказано о структурном наполнении, топологических связях, соотношении основных блоков проекта и внутренних помещений между собой. Однако именно этот аспект во многом может определить эффективность планировочной структуры. Внутри здания происходит множество процессов: загрузка продуктов, сортировка, приготовление пищи, подача блюд и т. д., все это требует определенной последовательности расположения помещений. При этом в рамках строительных норм и правил, технологических процессов существует большое количество вариаций размещения пространств. В таких ситуациях архитектор опирается на свой опыт, который позволяет ему компактно и эффективно расположить все элементы структуры.

Синтаксический анализ

В современном мире опыт архитектора по эффективному планированию помещений может иметь математическое выражение в виде цифр, одним из таких способов для анализа и инструментом планирования является теория пространственного синтаксиса. Краткая история восприятия пространства, резуль-

татом эволюции которой стала теория пространственного синтаксиса, была описана ранее [2]. На основе исследованного материала в настоящей статье будет затронута в большей мере аналитическая часть теории синтаксиса. Конфигурационный (синтаксический) анализ, представленный методом пространственного синтаксиса, позволяет моделировать город, который связывает интуицию и науку, его можно использовать для проектирования и планирования городов, а также в исследовательских целях [6, 7, 8]. Разработанный Биллом Хиллером и его коллегами из Университетского колледжа Лондона, он применяется в урбанистике с 1980-х гг. Этот метод состоит из расчета конфигурационных пространственных отношений в искусственных средах.

Метод пространственного синтаксиса может применяться к широкому диапазону масштабов и уровней в исследовании искусственной среды Б. Халлера, С. Ииды и В. Нес – от архитектурного пространства до уровня мегаполиса [7, 9, 15, 16]. Различные научные работы по раскрытию потенциала пространственного синтаксиса сводятся к описанию базовых понятий, в их числе регрессионная модель (Б. Халлер А. Пэн [10]), расширенная осевая линия, включающая трехмерные топографические изменения в пространстве (Ю. Асами, А. Кубат [4]), или использование пространственного синтаксиса в трехмерном параметрическом проектировании (З. Сиз [17]).

Создание графоаналитической схемы и скрипта

Существует огромное количество вариаций проектов зданий, созданных архитекторами, по-своему организующих пространство и топологические связи в функциональной схеме здания. Все это в рамках технического задания может приводить к созданию различных планировочных решений, каждое из которых будет верным и соответствовать заданию. Однако не существует унифицированной схемы помещений, поскольку каждый проект уникален и имеет неповторимые планировочные решения, зависящие от множества факторов [3].

Объект общественного питания является одним из примеров сочетания множества функций на небольшой территории. Особенность такого типа объекта заключается в необходимости создания большого количества отдельных помещений, соединенных единым технологическим процессом. Рассмотрев схему синтаксического анализа на данных примерах, можно применить ее на более крупных объектах.

В настоящем исследовании на основе рассмотрения трех объектов предпринята попытка выявить наиболее эффективную планировку кафе. Подразумевается определенный набор пространственных величин (глубина, энтропия и интеграция), свидетельствующих о близости помещений внутри каждого из функциональных блоков и наиболее структурированной компоновки этих блоков. Данные величины позволяют выявить объект, наиболее удобный для использования, приспособленный для ускорения всех производственных процессов и понятный для восприятия [7].

Наиболее «верная» планировка подразумевает наличие кратчайшего структурного пути от зоны загрузки до зала с посетителями. Также следует учитывать и пространственные характеристики всех помещений зоны кухни, администрации и хранения. Исходя из технического задания, все объекты зо-

ны кухни располагаются не в одном большом пространстве, а в отдельных помещениях. Большая часть из них связана через коридор и не имеет прямого прохода. Их пространственные величины должны быть максимально идентичны друг другу, что будет свидетельствовать о равномерном распределении помещений в планировке. При этом коридоры или другие транзитные помещения будут иметь множество связей и, следовательно, высокие показатели. Однако наименьшая разница в минимальном и максимальном значении свидетельствует о равномерной структуре пространства [7, 8, 16].

Наименьшее количество уровней j-графа является хорошим показателем, дающим визуальное представление о наикратчайших связях помещений и отсутствии «глубоких» (отстраненных) комнат. Распределение функций на разных уровнях графика свидетельствует об их структурном разделении, что является комфортным фактором для рабочих процессов.

Таким образом, можно выделить положительные критерии планировочной структуры, которые были использованы при синтаксическом анализе:

- наименьший диапазон для каждой из пространственных величин;
- объекты одной функциональной зоны должны иметь сходные пространственные значения;
- наименьшее количество уровней j-графа;
- функциональные зоны должны находиться на различных уровнях j-графа.

В рамках теории синтаксиса существует множество инструментов и методик для анализа, в данном случае будет использован *Convex map* (выпуклая карта), т. е. представление плана как набора связанных между собой пространств. В отличие от *Axial map* и *Iso vision map*, которые предназначены для анализа городской структуры, выбранный метод способен показать более точные результаты в замкнутых пространствах [6, 14, 15, 16].

Существует большое количество программ для синтаксического анализа: *QGis*, *UCL*, *depthmapX* и др. Однако для решения поставленной задачи наиболее подходящим является *Rhinoceros* вместе с дополнением *Grasshopper*, т. к. в программе имеется наиболее развитое проектирование с помощью скриптов и существует большое количество аналитических инструментов. В данном исследовании была использована часть разработок Пируза Нуриана и Самане Резвани, основанная на теории графов (графоаналитическое представление). Для данного типа исследований этот выбор является наиболее верным, исходя из целей исследования [2, 12, 13].

Для понимания планировочных процессов и использования инструментов пространственного синтаксиса для анализа необходимо рассмотреть процесс создания графоаналитических схем (рис. 1). Основная суть этого процесса заключается в выявлении вершин и ребер – элементов графа. В контексте данного исследования вершинами являются внутренние помещения. Поскольку графоаналитическая схема – это топологическое представление пространства, расположение вершин в пространстве не привязано к реальным размерам, и условно каждая вершина расположена в центре помещения, к которому она относится. Ребра – это транзитные связи между помещениями, которые соединяют вершины. Используя особенности топологического представления,

связи между пространствами не отображают реальную картину. Они показывают лишь линии кратчайшего сообщения между вершинами, а не реальные маршруты [1, 5].

В статье рассмотрено три примера студенческих проектов здания общественного питания (кафе на 75 посетителей). Для всех студентов было составлено единое техническое задание для объекта с идентичными блоками и внутренними помещениями, в результате были созданы совершенно уникальные планы. Каждый из планов имеет определенный набор функциональных блоков: административный, складской, блок кухни, блок персонала, блок загрузки, блок посетителей, а также набор внутренних помещений, соответствующих техническому заданию. Все проекты являются одноэтажными, но в примере 1 (рис. 2) и примере 2 (рис. 5) существует второй этаж, на котором расположен небольшой бар, состоящий из барной стойки и зала. Поскольку они имеют свою линию загрузки, для удобства анализа они были исключены из общей структуры плана.

Следующим этапом работы является загрузка графа аналитической схемы в программу Rhinoceroses, где каждой вершине и ребру будет присвоена соответственно функция внутри приложения Grasshopper (рис. 1). Разработанный скрипт позволяет получить четыре пространственные величины: энтропия, интеграция, контроль и выбор. В данном исследовании наибольший интерес представляют параметры энтропии и интеграции, т. к. они показывают свойства планировочной структуры, ее неоднородность и сложность [7, 12]. Показатели контроля и выбора не представляют большого интереса для данной работы, они обусловлены возможностью перехода из одного помещения в другое и имеют локальный характер. В основном их используют для выявления типологических сходств и различий [7, 8, 14].

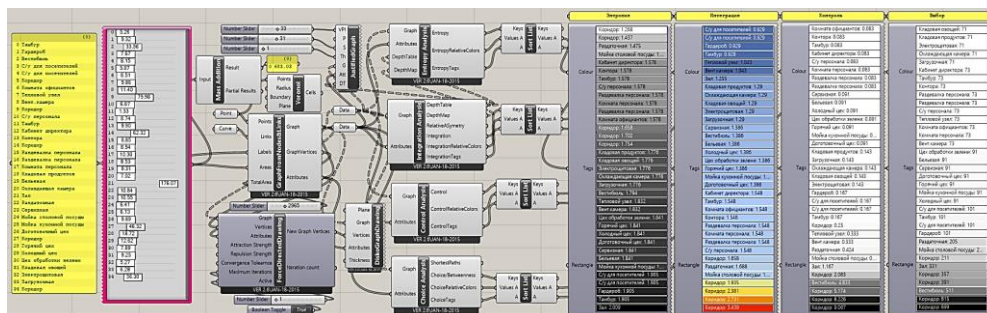


Рис. 1. Скрипт в программе Grasshopper
Fig. 1. Grasshopper language script

Интеграция (Integration) – это переменная, выражающая связь пространства с другими участками, окружающими его. Это ключевой параметр, ведущий к пониманию отношений, существующих между пользователями и городскими пространствами. Она может быть использована для прогнозирования потенциала встреч в пространстве, потому что напрямую связана с присутствием людей в данном месте. Чем больше интеграция пространства,

тем больше людей появится в нем. По этой причине интеграция иногда называется доступностью. Во всех исследованиях результаты подтверждают, что существует взаимосвязь между интеграцией пространства и присутствием в нем людей. Наиболее важным наблюдением является тот факт, что осевая система приведет пользователей к более интегрированным пространствам. Аналогичным образом, если меньшая интеграция означает меньшее присутствие человека и неконтролируемое пространство, это увеличивает шансы на преступное и антисоциальное поведение в таких структурах. В различных исследованиях расчеты интеграции могут различаться в зависимости от типа анализа. Но, несмотря на различные методики вычисления, конечные результаты часто схожи. Для расчета интеграции используется формула, выведенная Гертом Сабидусси [7]:

$$\text{Integration} = \frac{1}{\sum_k d_{ik}},$$

где d_{ik} является кратчайшим путем от участка i к участку k .

Интеграция бывает двух типов: локальная и глобальная. В данном исследовании из-за небольшой площади объекта будет использована только глобальная интеграция [7, 8].

Энтропия (Entropy) – это отношение глубины исследуемой зоны в пространстве относительно корневого пространства. Энтропия напрямую зависит от распределения глубины пространств рядом расположенных объёмов. При равномерном размещении элементов в структуре энтропия будет выше, при хаотичном расположении показатель будет ниже. Данная величина способна выражать культурно-топологические различия между пространственными схемами [7, 8, 9].

Глубина (Depth) определяется как наименьшее количество синтаксических шагов (в топологическом смысле), которые необходимы для достижения одного пространства и другого. Для расчетов глубины используют justified graph, или j-граф. Он дает представление о том, как выглядит вся конфигурация из конкретного пространства. Пространственная компоновка любого объёма не только выглядит по-разному, но и отличается в зависимости от точки, с которой рассматривается вся конфигурация. Данный инструмент также демонстрирует коммуникативность каждого из пространств, показывает количество его связей с элементами, находящимися на различных уровнях глубины. Распределение глубин, отображаемое через j-графы и лежащее в основе как архитектурных, так и геометрических схем, фактически является самой фундаментальной идеей в количественном измерении свойств конфигурации пространственных или формальных комплексов [8, 9, 11].

Большая часть помещений в проектах имеет одну или две связи. Диапазон контроля в большей части помещений варьируется от 0,08 до 1,4. В коридорах, как самых проходных пространствах, он равен 5–8 единицам. Аналогичная ситуация с выбором: основной диапазон по зданиям – 70–140, в коридорах и залах показатель доходит до отметок 400–900 единиц. В таблице показано количество помещений каждого из примеров с разбивкой по функциональным зонам, выявлено общее число связей и определены их типы. Не-

смотря на одинаковое количество помещений, каждый из примеров имеет различные по количеству комнат блоки и число связей.

Разделение помещений по функциям и связи между ними

Room division by functions and correlation between them

Функциональная зона	Пример 1	Пример 2	Пример 3
Транзитная зона	3	5	3
Административная зона	3	3	2
Зона кухни	8	8	10
Складская зона	7	5	6
Зона персонала	5	5	9
Зона посетителей	6	6	6
Техническая зона	3	3	3
Всего помещений	35	35	39
Связи между помещениями одной функции	7	10	7
Связи между помещениями с различными функциями	31	27	33
Всего связей	38	37	40

Глубина, являясь важной пространственной величиной, во многом схожа по своим результатам с интеграцией, а рассматриваемое пространство слишком мало, чтобы система отобразила весомые различия между этими показателями.

Поэтому числовой показатель глубины не учитывался, но для наглядности структуры пространства представлена схема j-граф, где корнем пространства (нулевым уровнем) является зона загрузки. Это сделано для наглядного отображения технологической схемы: от поступления продукта в кафе до его подачи в зал. В данном случае учитывалось количество пространственных ступеней и расположение помещений различных функциональных зон.

Пример 1. В результате анализа интеграции можно сделать вывод, что наиболее интегрированным помещением являются коридоры, расположенные между зоной загрузки и залом для посетителей, т. е. они являются наиболее посещаемыми и имеющими доступ ко всем помещениям объемами. Наибольший показатель интеграции достигает 2,653, а наименьшая величина имеется у санузла для посетителей, она составляет 0,815 (рис. 2–4).

Идентичные выводы можно сделать, опираясь на анализ энтропии: коридоры обладают наименьшими показателями, самыми «не системными» помещениями являются объекты блока персонала. Можно отметить также и идентичные показания у многих помещений, относящихся к определенным функциям. Помещение кухни, а также складские и загрузочные пространства имеют во многом идентичные параметры за исключением единичных помещений. Также и административный блок имеет отличные от других результаты, но между собой они схожи. На основании этого сравнения можно сделать

вывод, что помещения одинаково доступны и интегрированы в рамках своего блока. Параметры энтропии во многом схожи с графиком глубины, на котором представлено пять уровней (рис. 3). На j-графе отчетливо видно, что каждый уровень занят отдельной функциональной группой, что говорит об их удобстве в использовании (рис. 4).



Рис. 2. План и граф примера 1 с выделением функциональных зон
Fig. 2. Layout and graph of example 1 with functional zones

Энтропия	Интеграция	Контроль	Выбор
Коридор: 1.39 Камера отходов: 1.508 Кладовая сухих продуктов: 1.508 Охлаждающая камера: 1.508 Кладовая овощей: 1.508 Коридор: 1.524 Холодный цех: 1.669 Мойка кухонной посуды: 1.669 Моечная и кладовая тары: 1.669 Сервизная: 1.669 Бельевая: 1.669 Цех обработки зелени: 1.669 Доготовочный цех: 1.669 Загрузочная: 1.702 Горячий цех: 1.754 Вент.камера: 1.781 Мойка столовой посуды: 1.781 Зал: 1.839 Раздаточная: 1.861 Коридор: 1.995 Тамбур: 2.133 Кабинет директора: 2.133 Электрощитовая: 2.133 Контора: 2.133 Тепловой узел: 2.133 Комната персонала: 2.133 С/у персонала: 2.133 Мужская раздевалка: 2.133 Женская раздевалка: 2.133 Комната официантов: 2.133 Вестибюль: 2.174 С/у для посетителей: 2.277 Тамбур: 2.277 Гардероб: 2.277 С/у для посетителей: 2.277	С/у для посетителей: 0.815 Тамбур: 0.815 С/у для посетителей: 0.815 Гардероб: 0.815 Вент.камера: 1.119 Женская раздевалка: 1.132 Комната официантов: 1.132 Комната персонала: 1.132 Тамбур: 1.132 Мужская раздевалка: 1.132 С/у персонала: 1.132 Кабинет директора: 1.132 Электрощитовая: 1.132 Тепловой узел: 1.132 Контора: 1.132 Вестибюль: 1.146 Кладовая сухих продуктов: 1.346 Камера отходов: 1.346 Охлаждающая камера: 1.346 Цех обработки зелени: 1.366 Холодный цех: 1.366 Мойка кухонной посуды: 1.366 Доготовочный цех: 1.366 Сервизная: 1.366 Моечная и кладовая тары: 1.366 Бельевая: 1.366 Горячий цех: 1.386 Мойка столовой посуды: 1.386 Раздаточная: 1.522 Зал: 1.658 Загрузочная: 1.857 Коридор: 1.895 Коридор: 2.579 Коридор: 2.653	Холодный цех: 0.077 Мойка кухонной посуды: 0.077 Доготовочный цех: 0.077 Сервизная: 0.077 Моечная и кладовая тары: 0.077 Бельевая: 0.077 Цех обработки зелени: 0.077 Мужская раздевалка: 0.091 С/у персонала: 0.091 Тепловой узел: 0.091 Электрощитовая: 0.091 Женская раздевалка: 0.091 Контора: 0.091 Комната персонала: 0.091 Комната официантов: 0.091 Кабинет директора: 0.091 Тамбур: 0.091 Кладовая сухих продуктов: 0.143 Камера отходов: 0.143 Охлаждающая камера: 0.143 Кладовая овощей: 0.143 Гардероб: 0.2 С/у для посетителей: 0.2 С/у для посетителей: 0.2 Тамбур: 0.2 Мойка столовой посуды: 0.2 Вент.камера: 0.333 Горячий цех: 0.41 Раздаточная: 0.827 Зал: 1.11 Загрузочная: 1.22 Вестибюль: 4.25 Коридор: 4.501 Коридор: 9.06 Коридор: 10.143	Кладовая сухих продуктов: 69 Мужская раздевалка: 69 С/у персонала: 69 Камера отходов: 69 Сервизная: 69 Кладовая овощей: 69 Тамбур: 69 Комната персонала: 69 Электрощитовая: 69 Тепловой узел: 69 Контора: 69 Вент.камера: 69 Комната официантов: 69 Женская раздевалка: 69 Кабинет директора: 69 Доготовочный цех: 69 Охлаждающая камера: 69 Цех обработки зелени: 69 Мойка кухонной посуды: 69 Моечная и кладовая тары: 69 Бельевая: 69 Холодный цех: 69 Тамбур: 71 С/у для посетителей: 71 С/у для посетителей: 71 Тамбур: 71 Мойка столовой посуды: 71 Гардероб: 71 Горячий цех: 81 Раздаточная: 83 Загрузочная: 135 Вестибюль: 331 Зал: 373 Коридор: 639 Коридор: 739 Коридор: 829

Рис. 3. Результаты синтаксического анализа примера 1
Fig. 3. Syntactic analysis of example 1

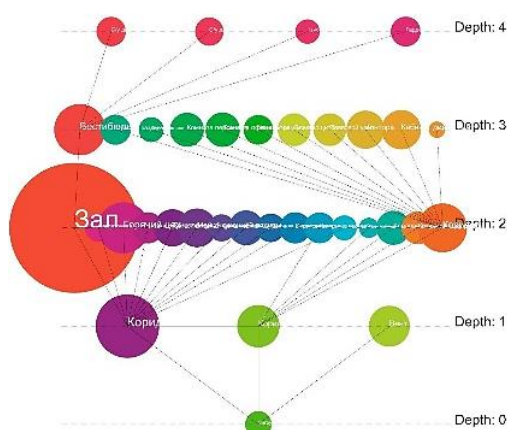


Рис. 4. J-граф для примера 1

Fig. 4. J-graph for example 1

Пример 2. Особенностью данного плана является кольцевая структура его рабочей зоны, т. е. коридор является нелинейным, а представляет собой замкнутый контур, за счёт чего показатели могут отличаться от других примеров (рис. 5–7).



Рис. 5. План и граф примера 2 с выделением функциональных зон

Fig. 5. Plan and graph for example 2 with functional zones

На рисунке видно, что наиболее интегрированным помещением является коридор в административной зоне. Все помещения (складское, кухонных зон) имеют довольно низкий показатель интеграции, в то время как административная и служебная зоны имеют повышенную интеграцию. Максимальное значение интеграции – 3,439, минимальное – 0,929. Анализ энтропии показывает, что помещение с меньшим показателем – коридор служебной части (1,269). Элемент системы с таким показателем можно расценивать как самый стабильный – центр структуры. В данном случае участок коридора является основным связующим звеном всего здания. Также можно заметить группировку помещений одной

функции в таблице по схожим показателям (рис. 7). J-граф имеет 6 уровней, большая часть элементов размещена на одном уровне, что свидетельствует о плотной структуре и в дальнейшем может негативно сказаться на рабочем процессе (рис. 6). Стоит отметить, что зал для посетителей расположен на предпоследнем уровне, т. е. топологическое расстояние до него идентично примеру 1.

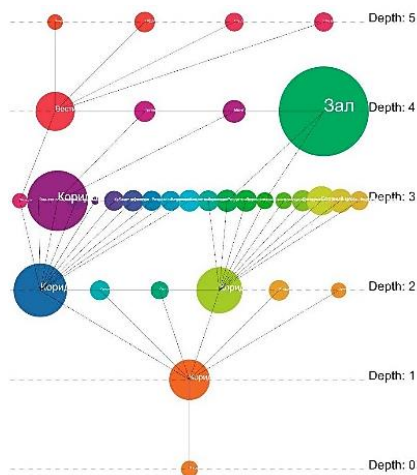


Рис. 6. J-граф для примера 2
Fig. 6. J-graph of example 2

Энтропия	Интеграция	Контроль	Выбор
Коридор: 1.268 Коридор: 1.437 Раздаточная: 1.475 Мойка столовой посуды: 1... Кабинет директора: 1.578 Контора: 1.578 Тамбур: 1.578 С/у персонала: 1.578 Раздевалка персонала: 1.578 Комната персонала: 1.578 Раздевалка персонала: 1.578 Комната официантов: 1.578 Коридор: 1.658 Коридор: 1.702 Коридор: 1.754 Кладовая продуктов: 1.776 Кладовая овощей: 1.776 Электрощитовая: 1.776 Охлаждающая камера: 1.776 Загрузочная: 1.776 Вестибюль: 1.794 Тепловой узел: 1.832 Вент.камера: 1.832 Цех обработки зелени: 1.841 Горячий цех: 1.841 Холодный цех: 1.841 Доготовочный цех: 1.841 Сервизная: 1.841 Бельевая: 1.841 Мойка кухонной посуды: 1... С/у для посетителей: 1.905 Гардероб: 1.905 Тамбур: 1.905 Зал: 2.009	С/у для посетителей: 0.929 С/у для посетителей: 0.929 Гардероб: 0.929 Тамбур: 0.929 Тепловой узел: 1.043 Вент.камера: 1.043 Зал: 1.255 Кладовая продуктов: 1.29 Охлаждающая камера: 1.29 Кладовая овощей: 1.29 Электрощитовая: 1.29 Загрузочная: 1.29 Сервизная: 1.386 Вестибюль: 1.386 Бельевая: 1.386 Холодный цех: 1.386 Цех обработки зелени: 1.386 Горячий цех: 1.386 Мойка кухонной посуды: 1... Доготовочный цех: 1.386 Кабинет директора: 1.548 Тамбур: 1.548 Комната официантов: 1.548 Контора: 1.548 Раздевалка персонала: 1.548 Комната персонала: 1.548 Раздевалка персонала: 1.548 С/у персонала: 1.548 Коридор: 1.658 Раздаточная: 1.688 Мойка столовой посуды: 1... Коридор: 1.935 Коридор: 2.381 Коридор: 2.731 Коридор: 3.439	Комната официантов: 0.083 Контора: 0.083 Тамбур: 0.083 Кабинет директора: 0.083 С/у персонала: 0.083 Комната персонала: 0.083 Раздевалка персонала: 0.083 Раздевалка персонала: 0.083 Сервизная: 0.091 Бельевая: 0.091 Холодный цех: 0.091 Цех обработки зелени: 0.091 Горячий цех: 0.091 Мойка кухонной посуды: 0... Доготовочный цех: 0.091 Кладовая продуктов: 0.143 Загрузочная: 0.143 Охлаждающая камера: 0.143 Кладовая овощей: 0.143 Электрощитовая: 0.143 Гардероб: 0.167 С/у для посетителей: 0.167 С/у для посетителей: 0.167 Тамбур: 0.167 Коридор: 0.25 Тепловой узел: 0.333 Вент.камера: 0.333 Раздаточная: 0.424 Мойка столовой посуды: 0... Зал: 1.167 Коридор: 2.083 Вестибюль: 4.833 Коридор: 5.174 Коридор: 8.226 Коридор: 9.067	Кладовая овощей: 71 Кладовая продуктов: 71 Электрощитовая: 71 Охлаждающая камера: 71 Загрузочная: 71 Кабинет директора: 73 Тамбур: 73 Контора: 73 Раздевалка персонала: 73 Раздевалка персонала: 73 С/у персонала: 73 Тепловой узел: 73 Комната официантов: 73 Комната персонала: 73 Вент.камера: 73 Цех обработки зелени: 91 Бельевая: 91 Сервизная: 91 Доготовочный цех: 91 Горячий цех: 91 Мойка кухонной посуды: 91 Холодный цех: 91 С/у для посетителей: 101 Тамбур: 101 С/у для посетителей: 101 Гардероб: 101 Раздаточная: 205 Мойка столовой посуды: 2... Коридор: 211 Зал: 331 Коридор: 357 Коридор: 391 Вестибюль: 511 Коридор: 815 Коридор: 899

Рис. 7. Результаты синтаксического анализа примера 2
Fig. 7. Syntactic analysis of example 2

Пример 3. Отличительной особенностью данного плана является цикличность пространства и протяженный служебный коридор, соединяющий практически все служебные помещения (рис. 8–10). Эти характеристики планировочной структуры оказывают большое влияние на пространственные величины.

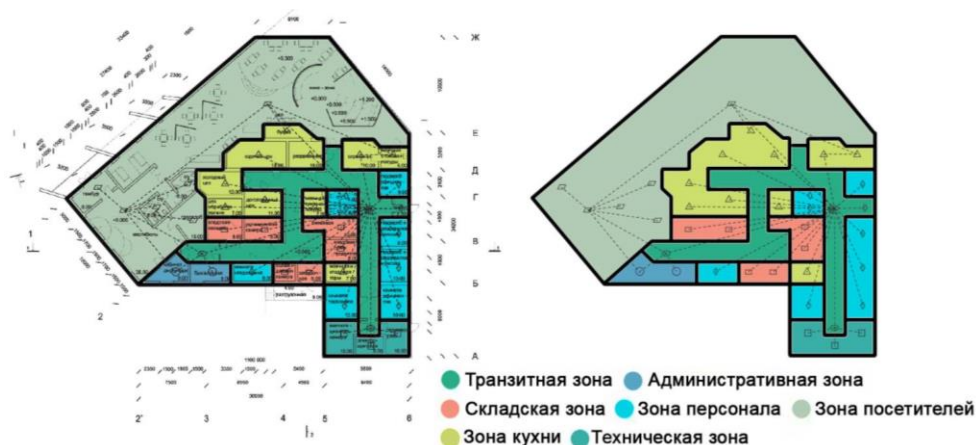


Рис. 8. План и граф примера 3 с выделением функциональных зон

Fig. 8. Plan and graph of example 3 with functional zones

Энтропия	Интеграция	Контроль	Выбор
Зал: 0.965 Коридор: 1.035 Буфет: 1.048 Бухгалтерия: 1.118 Моечная столовой посуды... Коридор: 1.196 Кабинет директора: 1.339 Моечная кухонной посуды... С/у персонала: 1.353 С/у персонала: 1.353 Гардероб официантов: 1.3... Тамбур: 1.353 Бельевая: 1.353 Цех обработки зелени: 1.3... Раздаточная: 1.353 Горячий цех: 1.353 Холодный цех: 1.353 Кладовая овощей: 1.353 Охлаждающая камера: 1.3... Доготовочный цех: 1.353 Раздевалка женская: 1.353 Моечная и кладовая тары... Комната персонала: 1.353 Загрузочная: 1.353 Комната кладовщика: 1.353 Охлаждающая камера: 1.3... Комната официантов: 1.353 Раздевалка мужская: 1.353 Кладовая сухих продуктов... Сервизная: 1.413 Коридор: 1.465 Вестибюль: 1.497 Электрощитовая: 1.548 Вент.камера: 1.548 Тепловой узел: 1.548 Тамбур: 1.604 С/у посетителей: 1.604 Гардероб: 1.604 С/у посетителей: 1.604	С/у посетителей: 1.114 Гардероб: 1.114 С/у посетителей: 1.114 Тамбур: 1.114 Электрощитовая: 1.299 Вент.камера: 1.299 Тепловой узел: 1.299 Бухгалтерия: 1.436 Буфет: 1.455 Моечная столовой посуд... Кабинет директора: 1.605 Вестибюль: 1.789 Бельевая: 2.059 Кладовая овощей: 2.059 С/у персонала: 2.059 С/у персонала: 2.059 Моечная кухонной посуд... Охлаждающая камера: 2.0... Раздаточная: 2.059 Горячий цех: 2.059 Цех обработки зелени: 2.0... Доготовочный цех: 2.059 Холодный цех: 2.059 Охлаждающая камера: 2.0... Комната официантов: 2.059 Комната персонала: 2.059 Загрузочная: 2.059 Моечная и кладовая тары... Раздевалка мужская: 2.059 Комната кладовщика: 2.059 Гардероб официантов: 2.0... Тамбур: 2.059 Кладовая сухих продуктов... Раздевалка женская: 2.059 Сервизная: 2.14 Коридор: 2.322 Коридор: 2.798 Зал: 2.872 Коридор: 6.821	С/у персонала: 0.038 С/у персонала: 0.038 Моечная кухонной посуд... Моечная и кладовая тары... Комната персонала: 0.038 Бельевая: 0.038 Раздевалка женская: 0.038 Тамбур: 0.038 Гардероб официантов: 0.0... Комната официантов: 0.038 Раздевалка мужская: 0.038 Цех обработки зелени: 0.0... Холодный цех: 0.038 Раздаточная: 0.038 Кладовая сухих продуктов... Горячий цех: 0.038 Доготовочный цех: 0.038 Охлаждающая камера: 0.0... Загрузочная: 0.038 Комната кладовщика: 0.038 Охлаждающая камера: 0.0... Кладовая овощей: 0.038 С/у посетителей: 0.143 С/у посетителей: 0.143 Гардероб: 0.143 Тамбур: 0.143 Электрощитовая: 0.25 Бухгалтерия: 0.25 Буфет: 0.25 Вент.камера: 0.25 Кабинет директора: 0.393 Сервизная: 0.538 Моечная столовой посуд... Зал: 1.681 Коридор: 1.681 Коридор: 2.798 Вестибюль: 5 Коридор: 23.25	Кабинет директора: 77 Буфет: 83 Бухгалтерия: 85 Тамбур: 89 Охлаждающая камера: 89 Раздевалка женская: 89 Электрощитовая: 89 Комната официантов: 89 Раздевалка мужская: 89 Кладовая овощей: 89 С/у персонала: 89 С/у персонала: 89 Гардероб официантов: 89 Моечная кухонной посуды... Бельевая: 89 Тепловой узел: 89 Цех обработки зелени: 89 Холодный цех: 89 Комната кладовщика: 89 Кладовая сухих продуктов... Горячий цех: 89 Раздаточная: 89 Комната персонала: 89 Вент.камера: 89 Доготовочный цех: 89 Охлаждающая камера: 89 Загрузочная: 89 Моечная и кладовая тары... Гардероб: 135 С/у посетителей: 135 С/у посетителей: 135 Тамбур: 135 Моечная столовой посуды... Сервизная: 159 Коридор: 341 Коридор: 503 Зал: 527 Вестибюль: 669 Коридор: 1709

Рис. 9. Результаты синтаксического анализа примера 3

Fig. 9. Syntactic analysis of example 3

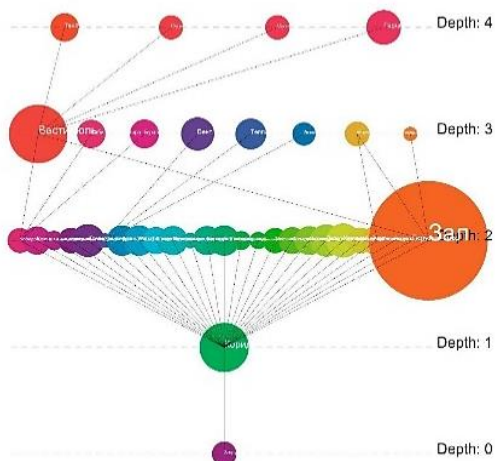


Рис. 10. J-граф для примера 3

Fig. 10. J-graph of example 3

Исследуя показатели интеграции, можно сделать вывод, что график распределения значений весьма неравномерный, наиболее интегрированным помещением является часть коридора в зоне кухни (6.821), зона с наименьшим показателем интеграции – главных вход (1.114).

Если помещения в служебном, складском и административном блоках имеют по большей части идентичные значения, то объекты в зоне кухни имеют различные показатели интеграции. Это может быть вызвано тем, что некоторые из помещений напрямую сообщаются со складской зоной, тем самым образуя новые связи и повышая интеграцию. На изображении (рис. 9) показателей энтропии мы можем видеть похожий оттенок у всех помещений кухонного, складского и административного блоков, что говорит о примерно одинаковой доступности в рамках рабочей зоны. J-граф выявил пять уровней глубины: практически все рабочие и складские помещения расположены на среднем уровне. Длинный коридор, не разделенный на отдельные блоки, а также кольцевое сообщение помещений внутри здания являются определяющими факторами планировки. В связи с этим технологические процессы в рамках здания могут пересекаться и затруднять работу друг друга (рис. 10).

Выводы

Находясь на стыке естественных, социальных и технических наук, синтаксический анализ позволяет по-новому взглянуть на планировочную структуру объекта, выявить различные пространственные величины, которые проявляют свойства планировки, недоступные при визуальном осмотре проекта.

В результате анализа трех планировочных структур можно сделать следующий вывод: первый пример имеет наименьшее разницу показателей интеграции – 0,8–2,6, показатели энтропии – 1,4–2,8. Эти диапазоны являются наименьшими среди исследуемых объектов, что говорит о наиболее эффективной разбивке внутренних помещений и связи между ними. Это способ-

ствуется наиболее удобной организации рабочего процесса внутри каждого из функциональных блоков. Результат анализа j-графа, на котором помещения распределены на разных уровнях, также подтверждает это.

Пример номер 2 отличается кольцевой структурой коридора, однако внутренняя разбивка сделана таким образом, что диапазон значений интеграции 0,9–3,4 и энтропии 1,3–2 превышает показатели первого примера. В данном объекте j-граф выявил шесть уровней глубины, что является самым большим показателем. Распределение функций на графике неравномерно, это говорит о пересечении рабочих процессов внутри помещений.

Пример номер 3 имеет самый высокий диапазон пространственных значений: интеграция – 1,1–6,8, энтропия – 0,9–1,6. Такое высокое значение интеграции вызвано длинным коридором, который соединяет множество функций и не разделен внутренними перегородками, как это сделано в предыдущих примерах. В рамках настоящего исследования это является негативным фактором, отрицательно сказывающимся на работоспособности и удобстве использования здания. J-граф представлен пятью уровнями, большая часть помещений расположена на среднем уровне. Это обусловлено единым пространством коридора.

Таким образом, исследование планировочных структур показало, что наиболее эффективной является планировка в первом примере, за ним следует второй, а самым неэффективным оказался третий. Исправить данную ситуацию в первую очередь можно разделением большого коридора, повторным анализом и последующим изменением компоновки внутреннего пространства.

В исследовании затронута лишь часть возможностей пространственного анализа в рамках программы Rhino. Изменение корня пространства в j-графе по-другому раскроет планировочную структуру и позволит выявить новые особенности помещения в зависимости от цели исследования. Более детальное сопоставление параметров энтропии, интеграции, контроля и выбора позволит всесторонне изучить планировочную структуру и выявить её особенности. Сопоставление результатов, полученных различными инструментами в разных программах, также даст новое видение ситуации. Однако, как было выявлено, параметров энтропии, интеграции и j-графа достаточно для исследования планировочной структуры в контексте выявления особенностей и сопоставления планировочных объемов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карабцев С.Н., Стуколов С.В. Построение диаграммы Вороного и определение границ области в методе естественных соседей // Вычислительные технологии. 2008. № 3. С. 65–80.
2. Целуйко Д.С. Создание графоаналитической модели сада культивации в г. Сучжоу. Генерирование планировочных структур с помощью Rhinoceros (Grasshopper) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 1. С. 58–72. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-1-58-72
3. Шубенков М.В. Структура архитектурного пространства : специальность 18.00.01 : диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры. Москва, 2006. 335 с.
4. Asami Y., Kubat A., Kitagawa K, Iida S. Introducing the third dimension on SpaceSyntax: Application on the historical Istanbul // Proceedings, 4th International Space Syntax Symposium London, 2003. P. 48.1–48.18.

5. Bondy J.U. Murty Graph theory with applications. North-Holland : Elsevier Science Ltd., 1976. P. 264.
6. Garau C., Annunziata A., Yamu C. A walkability assessment tool coupling multi-criteria analysis and space-syntax: The case study of Iglesias, Italy. *European Planning Studies*, 2020.
7. Hillier B. Space is the Machine. Cambridge University Press, Cambridge, 1996. P. 368.
8. Hillier B., Hanson J. The Social Logic of Space. Cambridge University Press, Cambridge, 1986. P. 296.
9. Hillier B., Iida S. Network and Psychological effects in Urban Movement / Eds. A.G. Cohn, D.M. Mark // *Spatial Information Theory*. International conference, COSIT 2005, proceedings. Springer, Heidelberg Berlin, 2005. P. 475–490.
10. Hillier B., Penn A. Rejoiner to Carlo Ratti // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2004. V. 31 (4). P. 501–511.
11. Khairanisa F. Function, Role, Limitation, and Potential of Space Syntax Analysis in Architectural Field // *Artificial Intelligence for Enhancing Architectural Design*. 2022. V. 1. № 2.
12. Nourian P., Rezvani S., Sariyildiz S. A syntactic architectural design methodology: Integrating real-time Space Syntax analysis in a configurative architectural design process // *Proc. 9th Conf. «Space Syntax Symposium»*. Seoul. South Korea, 2013. P. 1–15.
13. Ostwald M.J. The mathematics of spatial configuration: Revisiting, revising and critiquing justified plan graph theory // *Nexus Network Journal*. 2011. V. 13. № 2.
14. Tarabieh K., Nassar K. Abu-Obeid N. Malkawi F. The statics of Space Syntax: Analysis for stationary observers // *International Journal of Architectural Research Archnet-IJAR*. 2018. V. 12. № 1.
15. Van N.A., López M. Macro and micro scale spatial variables and the distribution of residential burglaries and theft from cars: an investigation of space and crime in the Dutch cities of Alkmaar and Gouda // *Journal of Space Syntax*. 2010. V. 2. P. 296–314.
16. Van N.A. Proceedings of the 13th Space Syntax Symposium The traditional half day DepthmapX workshop. The traditional half day DepthmapX workshop Depthmap for newbeginners // *Conference: 13th international space syntax symposium*. Bergen, Norway, 2022.
17. Xie Z. Exploration of the potential use of space syntax analysis in 3D parametric design: the case of Quanzhou // *Thesis, University College London*, 2011.

REFERENCES

1. Karabtsev S.N., Stukolov S.V. Construction of the Voronoi diagram and determination of the boundaries of the region in the method of natural neighbors. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2008; (3): 65–80. (In Russian)
2. Tseluiko D.S. Graphic-analytical model of cultivation garden in Suzhou. Generation of planning structures with Rhinoceros (Grasshopper). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (1): 58–72. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-1-58-72 (In Russian)
3. Shubenkov M.V. Architectural space structure. DSc Thesis. Moscow, 2006. 335 p. (In Russian)
4. Asami Y., Kubat A., Kitagawa K., Iida S. Introducing the third dimension on SpaceSyntax: Application on the historical Istanbul. In: *Proc. 4th Int. Space Syntax Symposium*. London, 2003. Pp. 48.1–48.18.
5. Bondy J.U. Murty graph theory with applications. North-Holland: Elsevier Science Ltd., 1976. 264 p.
6. Garau C., Annunziata A., Yamu C. A walkability assessment tool coupling multi-criteria analysis and space-syntax: The case study of Iglesias. Italy, *European Planning Studies*, 2020.
7. Hillier B. Space is the machine. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 368 p.
8. Hillier B., Hanson J. The social logic of space. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. 296 p.
9. Hillier B., Iida S. Network and psychological effects in urban movement. In: *Proc. Int. Conf. 'Spatial Information Theory'*, A.G. Cohn, D. M. Mark, eds. Heidelberg Berlin, Springer, 2005. Pp. 475–490.
10. Hillier B., Penn A. Rejoiner to Carlo Ratti. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2004; 31(4), Pp. 501–511.

11. *Khairanisa F.* Function, Role, Limitation, and potential of space syntax analysis in architectural field. *Artificial Intelligence for Enhancing Architectural Design*. 2022; 1 (2).
12. *Nourian P., Rezvani S., Sariyildiz S.* A syntactic architectural design methodology: Integrating real-time Space Syntax analysis in a configurative architectural design process. In: *Proc. 9th Conf. 'Space Syntax Symposium'*. Seoul South Korea, 2013. Pp. 1–15.
13. *Ostwald M.J.* The mathematics of spatial configuration: Revisiting, revising and critiquing justified plan graph theory. *Nexus Network Journal*. 2011; 13 (2).
14. *Tarabieh K., Nassar K., Abu-Obeid N., Malkawi F.* The statics of space syntax: Analysis for stationary observers. *International Journal of Architectural Research*. 2018; 12 (1).
15. *Van N.A., López M.* Macro and micro scale spatial variables and the distribution of residential burglaries and theft from cars: An investigation of space and crime in the Dutch cities of Alkmaar and Gouda. *Journal of Space Syntax*. 2010; 2: 296–314.
16. *Van N.A.* The traditional half day DepthmapX workshop. Depthmap for new beginners. In: *Proc. 13th Space Syntax Symposium*. Bergen, Norway, 2022.
17. *Xie Z.* Exploration of the potential use of space syntax analysis in 3D parametric design: The case of Quanzhou, Thesis University College London, 2011.

Сведения об авторах

Целуйко Дмитрий Сергеевич, доцент, Тихоокеанский государственный университет, 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Dima123117@gmail.com

Кирпо Арина Романовна, студентка, Тихоокеанский государственный университет, 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, 2018100396@pnu.edu.ru

Authors Details

Dmitrii S. Tseluiko, A/Professor, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, Dima123117@gmail.com

Arina R. Kirpo, Student, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, 2018100396@pnu.edu.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 05.02.2023
Одобрена после рецензирования 28.04.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 05.02.2023
Approved after review 28.04.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 54–69.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 54–69.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 726.025.4:2(571.16)

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-54-69

EDN: RZLDDE

ИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ РЕСТАВРАЦИИ. ВЛИЯНИЕ РОСТА КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ НА СОХРАННОСТЬ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ НА ПРИМЕРЕ КАМЕННЫХ ХРАМОВ ГОРОДА ТОМСКА

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

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

Аннотация. Исследуется негативное влияние выросшего культурного слоя каменных памятников архитектуры г. Томска и способы его ликвидации. В статье на конкретных примерах показано, как, даже при правильной профессиональной реставрации, с учётом изменившейся городской застройки и условий, спустя время могут появиться новые угрозы сохранности памятника.

Актуальность исследования обусловлена непрекращающимся и комплексным воздействием выросшего уровня культурного слоя на исторические здания.

Цель исследования: оценка влияния роста культурного слоя на объекты культурного наследия и составление рекомендаций для проведения работ по сохранению церквей г. Томска и благоустройству их территорий.

В процессе исследования применялись следующие *методы*: анализ специальной литературы и других источников, оценка общего технического состояния каменных памятников архитектуры, обобщение полученных данных при формировании предложений по ликвидации негативных последствий с учетом воздействия на объекты грунтовых вод и индукции.

Новизна работы заключается в анализе технического состояния каменных церквей г. Томска: храма Александра Невского и собора во имя святых первоверховных апостолов Петра и Павла; в разработке рекомендаций по устранению негативного влияния повышенного уровня культурного слоя. Методологической и теоретической основой исследования являются монографии, научные статьи археологов и архитекторов, приведённые в списке источников.

Представлены *рекомендации* по устранению негативного влияния выросшего культурного слоя, включающие в себя работы по планировке территории, замене покрытий, установке осушающих электроосмотических устройств, противофильтрационных завес, гидрофобизации фундаментов, восстановлению гидроизоляции и отмостки с соблюдением технических условий, являющиеся результатом исследования. Затронута важность информирования населения о последствиях неконтролируемого повышения уровня земли.

Ключевые слова: культовые здания и сооружения, памятник архитектуры, сохранение, реставрация, культурный слой, первоначальная отметка земли, подтопление, вертикальная планировка, гидроизоляция

Для цитирования: Кутуков А.А., Колокольцева Е.Н., Романова Л.С. Инженерные вопросы реставрации. Влияние роста культурного слоя на сохранность объектов культурного наследия на примере каменных храмов города Томска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 54–69. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-54-69. EDN: RZLDDE

ORIGINAL ARTICLE

ENGINEERING ISSUES IN RESTORATION. CULTURAL DEPOSIT GROWTH EFFECT ON PRESERVATION OF STONE CHURCHES IN TOMSK

Aleksandr A. Kutukov, Evgeniya N. Kolokoltseva, Larisa S. Romanova
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract: The article explores the negative impact of the grown cultural deposit on stone monuments of Tomsk and ways of its elimination. The urgency is caused by the continuous and complex influence of the grow cultural deposit on historical buildings.

Purpose: The article considers changes in urban development and conditions and new threats of monument preservation and their impact; gives recommendations for the conservation of Tomsk churches and the improvement of their territories.

Methodology/approach: The literature review, the analysis of general technical state of stone monuments in view of the ground water influence on them and proposals on this influence elimination. Articles, books and conferences of various authors – archaeologists and architects – given in the references.

Research findings: Recommendations are given to eliminate the negative impact of the increased cultural deposit, including the territory planning, replacement of coatings, installation of dewatering electro-osmotic devices, impervious curtains, hydrophobization of foundations, restoration of waterproofing and backsplash in compliance with specifications. The importance of informing the population about consequences of uncontrolled cultural deposit growth is noted herein.

Originality: The analysis of the technical state of stone churches of Tomsk such as Aleksander Nevsky and Peter and Paul; recommendations for eliminating the negative impact of the increased cultural deposit growth.

Keywords: church, temple, religious buildings, architectural monument, preservation, architecture, restoration, cultural deposit, waterlogging, vertical planning, waterproofing

For citation: Kutukov A.A., Kolokol'tseva E.N., Romanova L.S. Engineering issues in restoration. Cultural deposit growth effect on preservation of stone churches in Tomsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 54–69. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-54-69. EDN: RZLDDE

У нас стоял дом. Стоял-стоял, потом провалился.
Александр Сыроватко. Учёные против мифов-11. 2019

Процесс сохранения памятника архитектуры крайне сложен и включает в себя множество аспектов, которые не всегда могут быть учтены на различных этапах его новой жизни: при обследовании его технического состояния перед реставрацией; разработке проектной документации и производстве ремонтно-

реставрационных работ; последующей эксплуатации. Наибольшее негативное воздействие оказывает эксплуатация, имеющая накопительный эффект в отсутствие авторского надзора и соответствующих знаний у владельцев или арендаторов. Как болезнь, с которой долго отказываются идти к врачу. Одной из таких «болезней» является выросший уровень культурного слоя, прокладывающий путь для грунтовой влаги в незащищённую область стены.

Культурный слой – это постепенно формирующиеся в результате взаимодействия процессов почвообразования и разнообразной жизнедеятельности человека отложения [2]. Культурным он называется потому, что хранит в себе остатки деятельности человека, т. е. остатки нашей культуры. Культурный слой образуется очень медленно, но его толщина зависит больше не от прошедшего времени, а от интенсивности человеческой деятельности. Чем больше мы строим, тем быстрее растёт культурный слой. После завершения строительства остаются: известковый раствор, кирпичная крошка, обломки асфальта, куски рубероида, бытовой мусор и пр.; от производственных зданий – шлаки, фрагменты горнов, тиглей, обломки печей; от церковных сооружений – принесённая с разных частей города земля и глина, а в советский период – обломки декора и другие, довольно специфичные остатки; от пожаров, например, остаются прослойки угля, пепла и древесины [3].

Однако для памятников архитектуры культурным слоем в качестве негативно влияющего напластования считается повышение уровня поверхности земли как естественного, так и антропогенного характера в сравнении с оптимальным историческим показателем. В результате атмосферных и эрозийных процессов, антропогенного воздействия ежедневно в городе появляется огромное количество различных веществ, оседающих на тротуарах, дорогах, крышах домов и пр. Эти вещества сметаются и смываются к границам зданий и там оседают. Особое внимание следует обратить на сооружения религиозного характера. Сбитый в советское время декор, элементы куполов и колоколен, а также следы проведения подробных «строительных» – на деле разрушающих – работ – все это добавляло толщине культурного слоя довольно типичный для таких сооружений пласт. В итоге культурный слой вокруг храмов состоит из обычного строительного мусора – известкового раствора, кирпичного боя, закрытого сверху асфальтом или другим покрытием.

Темпы роста культурного слоя могут быть различными (рис. 1). Для уменьшения воздействия культурного слоя на здания необходимо следующее: большое количество коммунальных служб и техники для уборки улиц; соответствующая ширина этих улиц, позволяющая убирать мусор и отходы; наличие ливневых каналов. До XIX в. не существовало централизованного и постоянного вывоза всех отходов и мелкого мусора. Это было трудно реализовать с грунтовых дорог и деревянных тротуаров, которые лишь накапливали мусор под собой. Таким образом, приток отходов в город превышал их отток, что неизбежно вело к постоянному и бесконтрольному увеличению толщины культурного слоя [4]. Кроме того, в городе, ввиду плотности застройки и перенаселённости, культурный слой растёт быстрее, чем, например, в сельской местности.

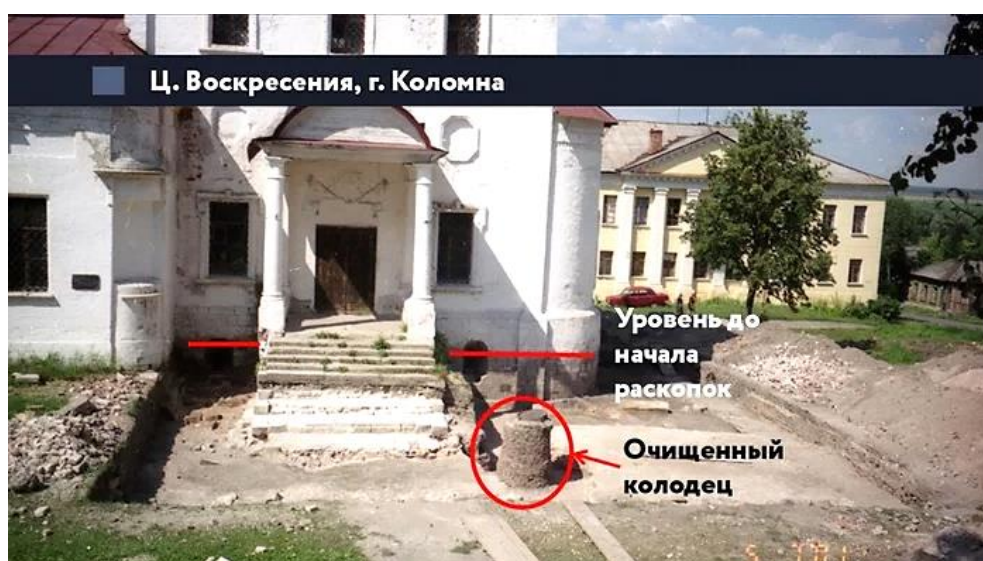


Рис. 1. Высота уровня культурного слоя у церкви XVII в. в г. Коломне [1]
Fig. 1. Height of the cultural deposit near the church in Kolomna, the 17th century [1]

С улучшением экономического благосостояния населения и ускорением темпов технического прогресса (примерно с середины XIX в.) стало уделяться больше внимания благоустройству территории городов. Появились системы канализации, дороги из брусчатки, многочисленные службы, регулярно занимающиеся вывозом мусора и очисткой улиц [4]. Благодаря таким мерам сильно снизились темпы роста культурного слоя, что заметно при сравнении зданий XVIII и XIX вв. В зданиях XVIII в. окна находятся практически на уровне современной отметки поверхности земли.

Рост культурного слоя в большей степени наблюдается у зданий, которые находятся ближе других к проезжим частям [5], поскольку дороги являются путями распространения различного мусора, грязи и прочих составляющих культурного слоя и требуют постоянного ремонта. В результате часть нижних этажей некоторых домов оказалась под землёй практически полностью. Когда значительная часть этажа оказывалась ниже уровня земли – в «яме», дом ещё сильнее отсыревал, особенно после осадков или во время таяния снега. В результате хозяева дома для отвода осадков добровольно выравнивали перепад высот, тем самым делая уклон от здания. Таким образом первый этаж превращался в цокольный или даже подвал (рис. 2).

С развитием и расширением городов появился ещё один фактор роста уровня культурного слоя – это устройство и последующий ремонт и замена дорожных покрытий. Для памятников истории архитектуры значительный период их существования пришёлся на соседство с дорогой из утрамбованного грунта или булыжников, брусчатки. При ремонте дорог строители очень редко обращали внимание на рост культурного слоя, требуя досыпки песка, связующего камни, и постоянного добавления новых камней, которые разбивались и измельчались в непосредственной близости от зданий [6]. Техноло-

гия срезания асфальта, превращения его в асфальтовую крошку и вывоз за пределы города стала применяться сравнительно недавно. Починить мостовые было проще, положив новый слой асфальта поверх старого (рис. 3).



Рис. 2. Музей им. Врубеля в Омске [5]
Fig. 2. Vrubel Museum in Omsk [5]



Рис. 3. Напластования материалов дорог разных периодов в Санкт-Петербурге [6]
Fig. 3. Layers of road materials of different periods in St.-Petersburg [6]

Отрывок из статьи П. Раевского свидетельствует о некачественном ремонте дорог в 1957 г.: «На некоторых улицах Любима закончен ремонт булыжной мостовой. Однако произведен он некачественно. Мостовщики не выполняют ряд очень важных работ: не делают правильной разбивки дороги, перевязки швов, расклиновки, по уложенному камню не засыпают мелкий гравий, плохо производят трамбовку. Все это приводит к тому, что камни ложатся неплотно. Между ними расстояние не должно превышать нескольких миллиметров, а оказывается от четырех до восьми сантиметров. Конечно, такая мостовая долго не прослужит. Например, на Октябрьской улице и на улице Ленина она уже стала разрушаться. Плохо и то, что при ремонте в некоторых случаях мостовая делается более узкой, чем прежде. Мостовая от хлебокомбината до Красноармейской улицы раньше была шириной в семь метров, а теперь – всего лишь в четыре. Это произошло потому, что хлебокомбинат заблаговременно не подготовился к ремонту, не заготовил нужного количества камня и песка. Некачественный ремонт приводит к тому, что через некоторое время наши мостовые снова выйдут из строя» [7]. Покрытие старых мостовых может быть обнаружено в культурном слое, выросшем вдоль вышеупомянутых улиц.

За последние несколько десятилетий в городе существенно изменилась гидрогеологическая ситуация, т. к. многие небольшие реки заключены в под-

земные коллекторы, а питание ручьёв поверхностными водами сократилось за счёт проведённых работ по благоустройству городских территорий, также периодически происходит утечка воды из городских коммуникаций. Все это ведет к изменению гидрогеологического режима, что не может не сказаться на техническом состоянии памятников архитектуры, которое неизменно ухудшается.

Важно отметить: нет одинаковых памятников и одинаковых условий роста культурного слоя. Его содержание и высота могут заметно отличаться не только в разных городах, но и на соседних улицах. Наличие выросшего уровня поверхности земли ведёт к серьёзным проблемам для памятника.

Для защиты исторических и современных зданий применяется горизонтальная и вертикальная гидроизоляция, которая предотвращает попадание влаги в стены. Уровень гидроизоляции задаётся во время строительства или при реставрации объекта. С ростом культурного слоя дневная поверхность земли может стать выше уровня гидроизоляции и покрыть собой незащищённые стены. Грунт же, «подпуская» воду к стене, препятствует её испарению, консервируя мокрые стены (испаряться эта влага может только через внешнюю и внутреннюю поверхности стен). Грунтовая влага, проходя через стены, дополнительно обогащается солями, которые содержатся в материалах кладки, поэтому количество высолов и их интенсивность в нижних частях стен значительно превосходят образование высолов в других частях, например на сводах. Методом борьбы против подсоса поверхностных вод фундаментами и стенами зданий являются мероприятия по устройству дренажей, водонепроницаемых завес, электродренажа, инъекции химических растворов в кирпичную и каменную кладку.

Если гидроизоляция нарушена или воздействию влаги подверглись незащищённые участки стен, то материал стен становится подвержен длительному воздействию нежелательной влаги. Сырость кирпича способствует его эрозии, потере прочности, развитию микроорганизмов и других биопоражений. Кирпич становится подвержен циклам замораживания-оттаивания запечатанной внутри влаги, ведущим к циклическим негативным деформациям. Процесс перемещения влаги в стене обусловлен тремя причинами: осмотическим давлением, капиллярным давлением и влиянием электрических зарядов. За длительный период воздействия циклов впитывания и испарения воды происходит разделение зарядов, обусловленное дифференциацией ионов солей, растворённых в кладке. В результате в зоне испарения в стене накапливаются носители электрических зарядов, создающих электрическое поле, что ускоряет движение воды в капиллярах. Нарушить этот процесс можно с помощью электроосмотической и электромагнитной защиты [8].

Рассмотрим влияние повышения уровня культурного слоя на техническое состояние памятников архитектуры на примере храма Александра Невского и собора во имя святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г. Томке, включённых в государственный реестр в качестве объектов культурного наследия местного значения. Исследуемые объекты демонстрируют различную картину повышения уровня культурного слоя.

Вокруг церкви Александра Невского, расположенной на пересечении улиц Герцена и Советская, уложена тротуарная плитка без отмостки. Цоколь

храма покрыт белёсыми пятнами, трещинами, наблюдаются следы намокания (рис. 4). Водостоки находятся близко к земле, предположительно, из-за поднятия отметки уровня поверхности земли после настила тротуарной плитки, водоприёмные каналы отсутствуют, кроме небольших отрезков прямо под водостоками, не имеющих продолжения.



Рис. 4. Церковь Александра Невского в Томске. Пятна на поверхности цоколя. Фото А. Кутукова:

a – высолы, ноябрь 2022 г.; *б* – зоны намокания, март 2023 г.

Fig. 4. Church of Aleksandr Nevsky in Tomsk. Stains on the plinth surface: *a* – efflorescence, November 2022; *b* – soaking zones, March 2023. Photograph by A. Kutukov

В соответствии с проектной документацией института СИ «Сибспецпроектреставрация» по реставрации вышеупомянутой церкви, к 2001 г. культурный слой вырос на 110 см. Решение о срезке культурного слоя рассматривалось специалистами как перспективное, в комплексе всего квартала и прилегающих к нему территорий. Данное решение невозможно было выполнить из-за близости трамвайного полотна и транспортной магистрали, т. к. срезка культурного слоя (посадка здания в «яму») привела бы к нарушению видовых характеристик, сложности в организации водоотвода, появлению лестниц и пандусов, которые стали бы дополнительными препятствиями для прихожан. Поэтому было принято решение срезать грунт в среднем на 20 см. Однако срезка грунта не была проведена.

Причиной появления пятен на цоколе (возможно, они были бы видны и выше зафиксированного уровня, но на период обследования здание было побелено до уровня карнизов), вероятно, стали высолы из-за сырости кладки.

Путь для влаги обеспечил уровень поверхности земли, повышенный тротуарной плиткой. По результатам выполненных измерений было установлено, что уклон плитки непостоянный и не соответствует нормам, имеются следы вспучивания грунта – швы между плитками разной толщины, наблюдается резкое изменение уклона (рис. 5). Кроме произошедшего повышения уровня земли выше отметки гидроизоляции следует отметить склонность данного покрытия к накоплению почвенной и другой влаги возле стен. Эта влага растворяет и переносит различные соли и другие вещества по материалу кладки к местам их концентрации с образованием высолов.

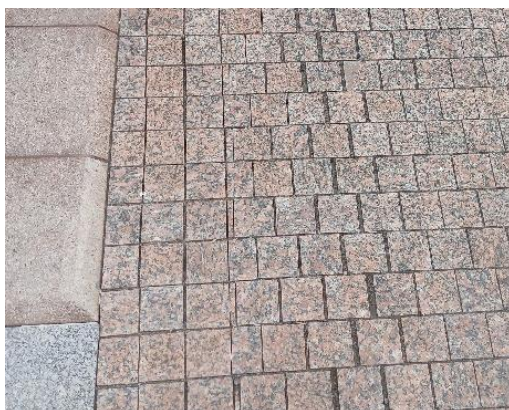


Рис. 5. Состояние тротуарной плитки у церкви Александра Невского. Фото А. Кутукова, март 2023 г.

Fig. 5. Sidewalk tiles near the Aleksandr Nevsky Church, March 2023. Photograph by A. Kutukov

Наличие солей в материале само по себе не оказывает разрушающего воздействия до тех пор, пока не начинаются температурные циклы в сочетании с влагой. Источником солей в кирпиче (особенно историческом) может быть глина, топливо, использовавшееся во время обжига кирпича, связующий раствор, а также осадки. Впитываясь через почву или с поверхности стены, они содержат растворённую углекислоту из воздуха, концентрация которой, при фильтрации через почву, увеличивается в сотни раз (в сравнении с влажным воздухом), создавая длительное воздействие на камень слабой угольной кислоты с образованием угольных солей. Кроме этого, грунтовые воды могут содержать различные растворённые неорганические минералы – сульфаты, карбонаты, соль, используемую как антиобледенитель для дорог и тротуаров, и пр. Их появление связано с деятельностью различных промышленных предприятий и применением удобрений даже на большом расстоянии от памятника. Появление органических веществ – аммиака, азотных соединений, гумусовой кислоты – связано с особенностями местной почвы. Также при повышенной влажности в пористом материале, каким является кирпич, могут содержаться нитрифицирующие молочнокислые и маслянокислые бактерии, образующие азотную и серную кислоты, реакции с которыми, помимо прямого воздействия на камень, происходят с образованием нерастворимых веществ, выпадающих в осадок прямо в теле кладки, и растворимых веществ, концентрирующихся в местах испарения влаги [9].

Стоит отметить, но не проецировать на исследуемые памятники, что источником солей могут служить и материалы, применённые при реставрации: гипс, цемент, известь, различные антисептики. Гипс, например, вследствие своей гигроскопичности, легко растворяется, мигрирует к поверхности и после испарения влаги кристаллизуется. Влияние цемента происходит по другой схеме. Являясь изначально щелочной средой, цемент активно реагирует с кислотами, обладая низкой паро- и влагопроницаемостью, удерживает влагу внутри, способствуя кристаллизации в наиболее пористых участках кладки, т. е. в кирпиче [9]. Важно упомянуть о возможности влияния на памятник так называемых верховодок – воды, попавшей в поверхностные слои грунта из-за утечек водопровода, канализации и пр. Эти потоки непостоянны, могут содержать повышенную концентрацию растворённых веществ, а главное, в сочетании с нагрузками от движения автотранспорта неравномерно снижать несущую способность грунта.

Другим заметным признаком проблем с подтоплением является построенный в период реставрации входной тамбур, который разделен с основным объёмом церкви деформационным швом по границе примыкания (рис. 6).



Рис. 6. Трещина в штукатурном слое по деформационному шву между основным объёмом церкви и тамбуром. Фото А. Кутукова, март 2023 г.

Fig. 6. Crack in the plaster layer along the deformation joint between the main church room and vestibule. March 2023. Photograph by A. Kutukov

Наличие потрескавшегося покрытия в данном месте свидетельствует о разной осадке фундаментов, которая, в свою очередь, могла произойти от нарушения гидрологических условий грунта и/или от сотрясений и вибраций, вызванных интенсивным движением автомобилей, трамваев и других транспортных средств по рядом расположенным улицам Герцена и Советской (фундаменты на улицах с интенсивным движением оседают больше, чем

в переулках и тупиках). Нарушение гидрологических условий происходит вследствие устройства тротуарной плитки, пропускающей осадки сквозь себя прямо в грунт; тогда как сама плитка – часть выросшего культурного слоя, непосредственно оказывающего влияние на здание.

На ухудшение гидрологических условий памятника могло повлиять также и другое, довольно неожиданное явление – электрохимический осмос, вызванный так называемыми блуждающими токами вокруг трамвайных путей, которые способствуют оттоку воды к близко стоящему зданию. Такое явление предлагается использовать как инструмент, с помощью которого можно предотвращать намокание и производить осушение стен электрографическим способом (электроосмотической защитой, или гальваноосмосом), при котором электромагнитное поле, генерируемое специальным аппаратом, на первой стадии выводит влагу из стен и фундаментов в грунт, а на второй – выполняет роль изолятора от грунтовой сырости [8].

На момент исследования (март 2023 г.) после сравнения высотных отметок можно полагать, что культурный слой вырос ещё на 20–29 см со стороны северного фасада и на 37 см – с южного. Покрытие из новой тротуарной плитки деформировано и имеет между рядами зазоры разной толщины, что говорит о неустойчивом основании (рис. 5). Проблемы, связанные с повышением уровня культурного слоя, предлагается решить, заменив тротуарную плитку, понизив уровень поверхности земли, а также выполнив отмостку, дренажные и деформационные системы, защищающие здание церкви от влаги и от влияния транспортных магистралей. Перед указанными мероприятиями необходимо выполнить работы по устройству гидроизоляции памятника. В качестве способов гидроизоляции можно применять: инъектирование кремнийорганическими соединениями, гелеобразующими растворами жидкого стекла, органическими смолами с отвердителем; оклейку бентоматами или другими современными оклеечными и обмазочными материалами; обмазку с предварительным осушением стен одним из электромагнитных и электрохимических способов.

Поверхность отмостки должна хорошо испарять воду, а это означает, что глина, бетон и асфальт не должны использоваться при её устройстве. Покрытиями, отвечающими указанным качествам, могут быть природные камни (булыги, брусчатка, лещадная плитка и т. п.). Камни покрытия необходимо укладывать с уклоном 6–10 %. Швы и отверстия между камнями засыпаются и заполняются крупным песком. Вдоль отмостки прокладывается и заполняется щебнем грунтовый водоприемный лоток, принимающий воду из фильтрующей постели и отводящий ее в дренаж либо в закрытую систему водостока. Устройство сплошной железобетонной отмостки вокруг храма категорически запрещено.

Собор во имя святых первоверховных апостолов Петра и Павла, расположенный на ул. Центральной, 12а, находится в другой ситуации. Площадь территории храма – 4400 м², у здания оштукатуренный и побеленный цоколь и поздняя железобетонная отмостка. Среди выраженных признаков проблем с подтоплением, вызванным в том числе поднявшимся уровнем культурного слоя, отмечается выветривание раствора в швах кладки, уровень которого до-

ходит практически до отметки 180 см от земли. Данный процесс в настоящее время не оказывает определяющего влияния на прочность конструкции, но увеличивает продуваемость стен и ухудшает эстетическое восприятие памятника. Фрагменты стены южного фасада окрашены масляной краской, по всей видимости, чтобы скрыть следы высолов (рис. 7).



Рис. 7. Состояние кирпичной кладки храма Петра и Павла в Томске. Фото А. Кутукова:
а – выветривание раствора в швах кладки; б – кладка, покрытая краской

Fig. 7. Brickwork of the Peter and Paul Church in Tomsk:
a – weathering of mortar in masonry joints; b – masonry covered with paint. Photograph by A. Kutukov

Дополнительным признаком влажности стен является отшелушивание штукатурного слоя на цоколе, в некоторых местах сопровождающееся выпадением кирпича, что свидетельствует о снижении прочности материала кладки. Самыми явными признаками сырости стен являются мокрые пятна, поднимающиеся на всю высоту помещения, и отшелушивание штукатурки на стенах внутри склепа (рис. 8). Поскольку с этой стороны проводилось меньше ремонтно-косметических работ, проблемы более выражены. Повышенная влажность в помещении подвала первого этажа, типичные высолы – это признаки плохо выполненной отсечной гидроизоляции или ее отсутствия [10]. При обследовании здания выяснился факт устройства инженерных сетей через пробитые в фундаменте и стенах каналы, изоляция которых проведена не по правилам или отсутствует вовсе. Это могло создать дополнительный путь попадания грунтовой и технической влаги в кирпичные стены памятника. Выросший уровень культурного слоя негативно повлиял на исторические ступе-

ни из песчаника, ведущие в склеп. К ним были добавлены две бетонные ступеньки, что исказило исторический облик и не сочетается с ним по стилистике, цвету, форме и материалу. Стенки входной части в склеп также имеют следы намокания.



Рис. 8. Состояние стен церкви Петра и Павла. Фото А. Кутукова, сентябрь 2022 г.
Fig. 8. Walls of the Peter and Paul Church, September 2022. Photograph by A. Kutukov

Культурный слой на этом объекте с 2007 г. до настоящего времени вырос в среднем на 22 см у входа и на 9,5 см со стороны апсиды. Часть работ по планировке территории памятника, предусмотренная проектом, не была выполнена, в результате: отсыпка в трещинах, водоотведение с территории выполнено не в соответствии со стандартами, прямо по грунту. Расположение церкви на территории, удаленной от интенсивного транспортного движения, способствовало минимальному росту культурного слоя. Об этом свидетельствуют исторические фотографии (рис. 9). Однако это не исключает негативного воздействия на памятник проблем водоотведения.

Изначально вода с территории отводилась в близлежащий пруд (рис. 10), который сегодня находится в запущенном состоянии. Сравнительно малыми усилиями можно вернуть естественный ход поверхностных вод от церкви, защитить тем самым здание от лишней влаги и улучшить состояние пруда, сохранив максимальную историчность памятника. Этого можно достичь за счёт грамотного выполнения вертикальной планировки. Большая часть территории представляет собой грунтовые поверхности и щебёночно-песчаные дорожки, что не составит трудностей при выполнении этих работ.



Рис. 9. Рост культурного слоя у церкви Петра и Павла. Сравнение 1908 и 2022 гг. Фото А. Кутукова

Fig. 9. Cultural deposit growth near the Peter and Paul Church. Comparison between 1908 and 2022. Photograph by A. Kutukov



Рис. 10. Пруд возле церкви Петра и Павла в г. Томске. 1908–1914 гг. Фото из фондов ТОКМ

Fig. 10. Pond of the Peter and Paul Church in Tomsk. 1908–1914. Photograph from Tomsk archives

Для продления жизни памятника следует провести работы по осушению и гидрофобизации фундаментов и стен, сооружению новой утеплённой отмостки, освободить исторические ступени от бетонных дополнений, а также предусмотреть устройство противодиффузионной завесы. Данные завесы представляют собой специальным образом выполненную в грунте вертикальную, практически непроницаемую штору (стену в грунте), которая преграждает путь потоку грунтовых вод к защищаемому от подтопления сооружению. Завеса может иметь в плане форму ограждающего кольца, полукольца, линии и т. д. Для более точного определения местоположения и формы завесы необходимы данные по гидрологии территории. Устройство завес осуществляется методом траншейных стенок или инъекционными способами. Эту технологию можно применять для любого вида грунта, неоднородного и переслаивающегося [10].

В заключение необходимо отметить, что в вопросах сохранения памятников существует множество нетипичных особенностей, ведущих к комплексным последствиям, и осведомлённость об этих особенностях, таких, например, как влияние поднявшегося уровня культурного слоя, – одно из важнейших условий сохранности памятника. Когда пользователи и собственники, ответственные за эксплуатацию исторического здания, будут осведомлены о правилах грамотной эксплуатации и проведения ремонтно-реставрационных работ, тогда и техническое состояние памятников в целом станет в меньшей степени и реже подвергаться опасности разрушения, повреждения или какого-либо дисгармоничного изменения. Кроме того, здание реже будет нуждаться в дорогостоящей реставрации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сыроватко А. Культурный слой: что о нем думают те, кто его никогда не видел, и какова реальность : доклад // Учёные против мифов : форум, 19 октября 2019. URL: https://history.eco/syrovatko_kulturnyj_sloj_kakova_realnost/ (дата обращения: 27.03.2023).
2. Лесман Ю. Культурный слой поселений и характер вещевого комплекса. Поселения: среда, культура, социум // Материалы тематической конференции, Санкт-Петербург, 6–9 октября 1998 г. Санкт-Петербург : СПбГУ, 1998. 216 с.
3. *Культурный слой города* – детективная история XIX века : аудиозапись // Музей истории Екатеринбурга.
4. Вербов А. Скорость прироста культурного слоя, или почему масса городов проваливается под землю. URL: <https://lsvsx.livejournal.com/947201.html> (дата обращения: 08.03.2023).
5. *Закопанные дома по всему миру*. URL: <https://colodu.club/24208-zakopannye-doma-po-vsemu-miru.html> (дата обращения: 28.03.2023).
6. *Культурный слой*. Во время раскопок. Кто построил Петербург? Часть I. URL: <https://fishki.net/2491028-cto-postroil-peterburg-chasty-i-ljuto-ne-minusujte/gallery-5238516-kulturnyj-slojvo-vremja-raskopok-photo.html> (дата обращения: 27.03.2023).
7. Раевский П. Некачественный ремонт // Северный колхозник. 1957. 28 сентября. № 91 (3055). С. 3.
8. Гроздов В. Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений. Санкт-Петербург, 2005. 114 с.
9. Аксенова И. Влияние водорастворимых солей на долговечность памятников архитектуры // Инженерно-технические вопросы сохранения памятников истории и культуры : сб. научных трудов Министерства культуры СССР. Москва, 1989. 179 с.

10. Романенко О., Коробова О. Современные методы защиты «старой» застройки города Барнаула от подтопления грунтовыми водами // Ползуновский вестник. 2013. № 4-1. С. 28–31.

REFERENCES

1. Syrovatko A. Cultural deposit: What those who have never seen it think of it, and what the reality is. Report. In: *Proc. Thematic Forum 'Scientists Against Myths'*, 2019. Available: https://history.eco/syrovatko_kulturnyj_sloj_kakova_realnost/ (accessed March 27, 2023). (In Russian)
2. Lesman Yu. Cultural layer of settlements and the nature of material complex. Settlements: Environment, culture, society. In: *Proc. Thematic Conf.*, Saint-Petersburg, 6–9 October 1998. 1998. 216 p. (In Russian)
3. The cultural layer of the city as a detective story of the 19th century. Audio recording. Ekaterinburg History Museum. (In Russian)
4. Verbov A. The rate of growth of the cultural layer or why cities are falling underground. Available: <https://lsvsx.livejournal.com/947201.html> (accessed March 8, 2023). (In Russian)
5. Buried houses around the world. Available: <https://colodu.club/24208-zakopannye-doma-po-vsemu-miru.html> (accessed March 28, 2023). (In Russian)
6. Cultural layer. During the excavations. Who built Petersburg? Part I. Available: <https://fishki.net/2491028-kto-postroil-peterburg-chasty-i-ljuto-ne-minusujte/gallery-5238516-kulturnyj-slojvo-vremja-raskopok-photo.html> (accessed March 27, 2023). (In Russian)
7. Raevsky P. Poor-quality repair. In: *Severnoy Kolkhoznik*. 1957. No. 91 (3055). P. 3. (In Russian)
8. Grozdov V. Strengthening of building structures in the restoration of buildings and structures. Saint-Petersburg, 2005. 114 p. (In Russian)
9. Aksenova I. Influence of water-soluble salts on the durability of architectural monuments. In: *Engineering and technical issues of preservation of monuments of history and culture*. In: Coll. Papers Min. USSR Ministry of Culture. Moscow, 1989. 179 p. (In Russian)
10. Romanenko O., Korobova O. Modern methods of protection of old buildings of Barnaul from underflooding by groundwater. *Polzunov Vestnik*. 2013: 4-1; 28–31. (In Russian)

Сведения об авторах

Кутуков Александр Алексеевич, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, surolk@outlook.com

Колокольцева Евгения Николаевна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, djeyn.doc@gmail.com

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

Authors Details

Aleksandr A. Kutukov, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, surolk@outlook.com

Evgeniya N. Kolokoltseva, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, djeyn.doc@gmail.com

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

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 15.04.2023
Одобрена после рецензирования 28.04.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 15.04.2023
Approved after review 28.04.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 70–80.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 70–80.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 05.23.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-70-80

EDN: QBMTGY

СООТНОШЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ, ОБЪЕКТОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ И НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЗОНЫ НАУКОГРАДОВ РОССИИ

Екатерина Денисовна Малова

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

Аннотация. Рассматривается развитие научных центров на территории России, включающее строительство новых городов с определенной научно-производственной и образовательной спецификой.

Для комплексного освоения территорий и устойчивого формирования новых наукоградов необходимо выявить особенности соотношения основных функций научного города, включая соотношение жилого фонда, площадей научно-производственного и образовательного назначения, что является *целью исследования*.

Основной задачей исследования стало определение оптимального соотношения площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны для планируемых научных городков на примере действующих наукоградов.

Исходя из различной плотности градостроительного освоения, в расчетах учитывались площади не функциональных зон, а отдельных объектов с учетом этажности. В работе рассматривались научные городки Протвино, Пущино, Черноголовка, Фрязино, Троицк и Кольцово, численность населения которых возможно сопоставить с расчетной численностью новых научных центров.

Выявлено, что, несмотря на различную направленность и специфику научных исследований, значительную разницу в размерах городских территорий и длительность развития научно-производственной базы, рассмотренные наукограды обладают близким соотношением жилья, объектов обслуживания и научно-производственных площадей. Их усредненное соотношение стремится к значениям 60, 10 и 30 % соответственно. Принципиальная планировка научных городков не менялась, при этом наблюдался экономический и демографический рост и развитие научного сектора.

В связи с этим можно сделать следующий *вывод*: приведенное соотношение можно считать оптимальным и использовать на начальных этапах планирования нового научного города, если специфика соотношения рассматриваемых объектов не уточняется техническим заданием.

Ключевые слова: академгородок, наукоград, научный центр, функциональная структура, планировочная организация, соотношение функций в наукограде

Для цитирования: Малова Е.Д. Соотношение площадей жилой застройки, объектов обслуживания и научно-производственной зоны наукоградов России // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 70–80. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-70-80. EDN: QBMTGY

ORIGINAL ARTICLE

CORRELATION BETWEEN RESIDENTIAL AREA, SERVICE FACILITIES, RESEARCH AND PRODUCTION ZONE OF RUSSIAN SCIENCE CITIES**Ekaterina D. Malova***Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Novosibirsk, Russia*

Abstract. *Purpose:* Identification of the correlation between service facilities, research and production zone of Russian science cities.

Research findings: Based on the difference in the urban development, calculations include individual objects, taking into account the number of floors, rather than functional zones. The cities of Protvino, Pushchino, Chernogolovka, Fryazino, Troitsk and Koltsovo are analyzed; the population can be compared with the estimated number of new scientific towns. Despite a significant difference in the size of urban areas and the development of the research and production base, these science cities have a close ratio of housing, service facilities and research and production areas, i.e., 60, 10 and 30 %, respectively. The basic layout of science campuses does not change, while economic, demographic and scientific development is observed.

Practical implication: The detected correlation can be called rational and used at the initial stage of planning a new science city.

Keywords: academic city, science city, science center, functional structure, planning

For citation: Malova E.D. Correlation between residential area, service facilities, research and production zone of Russian science cities. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (3): 70–80. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-70-80. EDN: QBMTGY

В России официальный статус наукограда впервые был присвоен в 2000 г. Обнинску. Его научной специализацией является развитие атомной энергетики и ядерных технологий [1]. Однако научные городки как автономные градостроительные образования в нашей стране формировались и развивались на протяжении всего XX в.

Строительство современных научных центров на территории России реализуется на базе существующих наукоградов или в структуре крупнейших агломераций. Одним из наиболее масштабных, реализуемых в настоящее время проектов является город для IT-специалистов Иннополис в Татарстане [2, 3]. Еще одним проектом, предполагающим развитие научной базы Новосибирской агломерации, стала концепция создания зоны опережающего развития – Наукополис. Задачей этого проекта является объединение потенциала существующих и новых научных площадок в единое пространство [4, с. 6].

В процессе развития территории и при строительстве новых наукоградов возникает вопрос учета специфических градостроительных требований к функционально-планировочному и пространственному решению территорий научных центров, спецификой которого является концентрированное размещение наукоемких производств, других объектов научно-производственного назначения и образования.

Целью исследования является определение оптимального соотношения площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-

производственной зоны для планируемых научных городков на примере действующих наукоградов. Под оптимальным соотношением подразумевается определение усредненных пропорций, характерных для существующих функционально-планировочных решений исследуемых городков.

Задачи работы: сформировать критерии отбора наукоградов для последующего анализа; создать информационные модели отобранных городов для оптимизации расчета площадей жилой застройки, объектов обслуживания, объектов научно-производственной зоны; провести расчет каждого объекта в соответствии с этажностью, используя модели; выполнить расчет итоговых площадей по категориям в процентных показателях; сопоставить значения и выявить усредненный показатель соотношения площадей.

В результатах исследования учитываются площади объектов, а не площади функциональных зон. Исходя из различной плотности градостроительного освоения, соотносить площадные значения территорий было бы некорректно. Площади объектов были суммированы и сопоставлены по категориям в соответствии с Градостроительным кодексом РФ, ст. 35 «Виды и состав территориальных зон». Так, в первую категорию были включены объекты жилой застройки всех типов. Вторая категория включала объекты социального назначения, объекты дошкольного, общего образования и торговли. К третьей категории были отнесены объекты, которые связаны с реализацией научно-технического потенциала и высшим образованием. Близкое размещение и тесное сотрудничество наукоемких производств, институтов и студенческих городков составляют особенность наукоградов. Взаимосвязь научной, производственной и образовательной функций является условием формирования научных центров (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика принятых к расчету категорий объектов

Table 1

Characterization of objects

№ кат.	Наименование принятой в расчете категории	Типология объектов	Территориальная зона в соотв. с ГрК РФ, ст. 35
1	Объекты жилой застройки	Индивидуальные жилые дома; дома блокированной застройки; среднеэтажные и многоэтажные многоквартирные дома	Жилые зоны
2	Объекты обслуживания населения	Объекты дошкольного, начального общего и среднего общего образования; объекты здравоохранения; объекты торговли и общественного питания	Жилые зоны; общественно-деловые зоны
3	Объекты научно-производственного назначения	Объекты предпринимательской деятельности; объекты среднего профессионального и высшего образования, административных, научно-исследовательских учреждений; коммунальные и складские объекты; объекты делового и финансового назначения; производственные объекты	Общественно-деловые зоны; производственная зона; зона инженерной и транспортной инфраструктур

Расчеты проводились по следующему алгоритму. Сначала определялась площадь каждого объекта произведением площади застройки и его этажности. Полученные площади суммировались по каждой категории и сопоставлялись в процентном соотношении.

Расчет суммарного показателя категории для одного наукограда выглядит следующим образом:

$$S_{\text{категории}} = \sum (S_{\text{застр. объекта}} \cdot \Theta_{\text{объекта}}),$$

где $S_{\text{категории}}$ – суммарный показатель площади категории, м^2 ; $S_{\text{застр. объекта}}$ – площадь застройки одного объекта категории, м^2 ; $\Theta_{\text{объекта}}$ – этажность данного объекта.

Общая площадь для одного наукограда определяется суммой показателей площадей по всем трем категориям:

$$S_{\text{общ}} = \sum S_{\text{категорий 1,2,3}},$$

где $S_{\text{общ}}$ – общая площадь объектов для одного наукограда, м^2 ; $S_{\text{категории}}$ – суммарный показатель площади категорий для соответствующего наукограда, м^2 .

Далее полученные значения выражались в процентном соотношении:

$$K_n = \frac{S_{\text{категории } n}}{S_{\text{общ}}} 100 \%,$$

где K_n – показатель емкости для n -категории, %; $S_{\text{категории } n}$ – суммарный показатель площади n -категории, м^2 ; $S_{\text{общ}}$ – общая площадь объектов для одного наукограда, м^2 .

Полученные соотношения для каждого наукограда сравниваются. Результатом расчета является формирование усредненного показателя, который определяется средним арифметическим значением:

$$\varepsilon_n = \frac{\sum K_n}{N},$$

где ε_n – усредненный показатель емкости для n -категории, %; K_n – показатель емкости для n -категории, %; N – количество наукоградов, участвующих в расчете категории.

Для подсчета усредненного показателя каждой категории были выбраны наукограды России, которые соотносимы по нескольким критериям: действующий статус наукограда в течение десяти лет и более; представление наукоградами отличных друг от друга отраслей наукоемкого производства; численность населения в пределах 20–60 тыс. чел., что соответствует средней фактической и расчетной численности проектируемых наукоградов в России [5, 6, 7].

Существенная разница в плотности градостроительного освоения не позволяет провести корректное сравнение площадей функциональных зон, поэтому размеры территорий наукограда приводились для анализа плотности градостроительного освоения, но не учитывались в качестве критерия и последующих расчетов. Так, территория с меньшей площадью может включать застройку повышенной плотности и размещать большее количество жителей, организаций

обслуживания и предприятий научно-производственного сектора. И наоборот, территория с большей площадью может включать застройку пониженной плотности. Задачей исследования стало сравнение площадей объектов определенного назначения, что позволило проследить наиболее четкую взаимосвязь различных функций наукоградов.

Для анализа были выбраны следующие города: Протвино, Пущино, Черноголовка, Фрязино, Троицк и Кольцово (табл. 2) [8, 9, с. 12].

Таблица 2

Наукограды России, рассматриваемые в исследовании

Table 2

Russian science cities

№ п/п	Город	Субъект РФ	Статус	Числ. насел., тыс. чел. (2020 г.)	Площадь тер., км ²
1	Протвино	Московская область	Наукоград (с 2008 г.)	35,4	26,69
2	Пущино	Московская область	Наукоград (с 2005 г.)	20,7	17,84
3	Черноголовка	Московская область	Наукоград (с 2008 г.)	21,3	2,02
4	Фрязино	Московская область	Наукоград (с 2003 г.)	59,5	9,00
5	Троицк	Московская область	Городской округ в составе Троицкого административного округа Москвы, Наукоград (с 2007 г.)	61,3	16,33
6	Кольцово	Новосибирская область	Наукоград (с 2003 г.)	17,5	8,96

1. Протвино. В 2008 г. Постановлением Правительства РФ № 624 Протвино присвоен статус наукограда Российской Федерации. Научной специализацией города является исследование фундаментальных свойств материи. Так, на территории наукограда расположены Государственный научный центр Российской Федерации «Институт физики высоких энергий» и уникальная для Российской Федерации установка ускорительного комплекса протонов [10]. Институт реализует свою деятельность с 1963 г. [11], ускорительная установка работает с 1967 г. [12].

Всего на территории выявлено 2 567 841 м² площади объектов с учетом этажности каждого ($S_{\text{общ}}$). В результате анализа площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны имеется соотношение 52,5; 14,4 и 33,1 соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Баланс площадей по категориям, г. Протвино

Table 3

Area categories in Protvino

№ кат.	Наименование категории	Площадь категории $S_{\text{категории}}, \text{м}^2$	Показатель емкости категории $K_n, \%$
1	Объекты жилой застройки	1 348 474	52,50
2	Объекты обслуживания населения	369 971	14,40
3	Объекты научно-производственного назначения	849 396	33,10
Итого ($S_{\text{общ}}$)		2 567 841	100

2. Пушкино. С 2005 г. Пушкино является наукоградом России [13]. Основным градообразующим комплексом является Пушкинский научный центр Российской академии наук, специализирующийся на исследованиях в области физико-химической биологии. Центр организован в 2018 г. путем объединения научных институтов, ведущих свою деятельность с 1952 г. [14].

Всего на территории выявлено 1 586 154 м² площади объектов с учетом этажности каждого ($S_{\text{общ}}$). В результате анализа площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны имеется соотношение 51,5; 7,6 и 40,9 % соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Баланс площадей по категориям, г. Пушкино

Table 4

Area categories in Pushchino

№ кат.	Наименование категории	Площадь категории $S_{\text{категории}}, \text{м}^2$	Показатель емкости категории $K_n, \%$
1	Объекты жилой застройки	817 230	51,52
2	Объекты обслуживания населения	120 104	7,58
3	Объекты научно-производственного назначения	648 820	40,90
Итого ($S_{\text{общ}}$)		1 586 154	100

3. Черноголовка. Постановлением Правительства Российской Федерации № 623 от 18 августа 2008 г. г. Черноголовке присвоен статус наукограда Российской Федерации. Однако к градообразующему научно-производственному комплексу города относятся институты, научная деятельность которых реализуется с 1956 г.: Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук (1983); Институт проблем химической физики Российской академии наук (1956); Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (1987); Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро РАН (1973); Научно-технологический центр «Электронтех» РАН (1957). Специализацией города является обеспечение

обороноспособности страны и производство приборов для широкого спектра научных исследований.

Всего на территории выявлено 1 659 639 м² площади объектов с учетом этажности каждого ($S_{\text{общ}}$). В результате анализа площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны определено соотношение 59,5; 11,9 и 28,6 % соответственно (табл. 5).

Таблица 5

Баланс площадей по категориям, г. Черноголовка

Table 5

Area categories in Chernogolovka

№ кат.	Наименование категории	Площадь категории $S_{\text{категории}}, \text{м}^2$	Показатель емкости категории $K_n, \%$
1	Объекты жилой застройки	987 602	59,51
2	Объекты обслуживания населения	197 106	11,87
3	Объекты научно-производственного назначения	474 931	28,62
Итого ($S_{\text{общ}}$)		1 659 639	100

4. Фрязино. С 2003 г. Фрязино является наукоградом России [15]. Научно-производственная база основана на производстве электрооборудования, в том числе систем связей военной и космической отраслей. Несмотря на то, что Фрязино стал наукоградом в 2003 г., ключевые наукоемкие производства (АО «НПП «Исток» им. Шокина»; АО «НИИ «Платан» с заводом при НИИ»; Специальное конструкторское бюро Института радиотехники и электроники РАН и другие организации) созданы в 1950–60-х гг. [16].

Всего на территории выявлено 4 698 869 м² площади объектов с учетом этажности каждого ($S_{\text{общ}}$). В результате анализа площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны определено соотношение 60,7; 7,5 и 31,8 % соответственно (табл. 6).

Таблица 6

Баланс площадей по категориям, г. Фрязино

Table 6

Area categories in Fryazino

№ кат.	Наименование категории	Площадь категории $S_{\text{категории}}, \text{м}^2$	Показатель емкости категории $K_n, \%$
1	Объекты жилой застройки	2 853 136	60,72
2	Объекты обслуживания населения	351 055	7,47
3	Объекты научно-производственного назначения	1 494 678	31,81
Итого ($S_{\text{общ}}$)		4 698 869	100

5. Троицк. Троицк – район Москвы, ранее город со статусом наукограда. Несмотря на вхождение территорий в состав Москвы, Троицк сохраняет

научный статус [17]. Троицкий научный центр специализируется на лазерной и ядерной физике. Основой научно-производственной базы является Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, ведущий свою историю с 1952 г. [18].

Всего на территории выявлено 3 461 929 м² площади объектов с учетом этажности каждого ($S_{\text{общ}}$). В результате анализа площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны получено соотношение 63,5; 12,2 и 24,3 % соответственно (табл. 7).

Таблица 7

Баланс площадей по категориям, г. Троицк

Table 7

Area categories in Troitsk

№ кат.	Наименование категории	Площадь категории $S_{\text{категории}}$, м ²	Показатель емкости категории K_n , %
1	Объекты жилой застройки	2 197 335	63,47
2	Объекты обслуживания населения	424 464	12,26
3	Объекты научно-производственного назначения	840 130	24,27
Итого ($S_{\text{общ}}$)		3 461 929	100

6. Кольцово. Кольцово – рабочий поселок, расположенный на территории Новосибирской области и обладающий статусом наукограда. Кольцово является первым наукоградом России с биотехнической специализацией [19].

Всего на территории было выявлено 3 461 929 м² общей площади объектов с учетом этажности каждого ($S_{\text{общ}}$). В результате анализа площадей жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны выявлено соотношение 61,7; 11,4 и 26,9 % соответственно (табл. 8).

Таблица 8

Баланс площадей по категориям, Кольцово

Table 8

Area categories in Koltsovo

№ кат.	Наименование категории	Площадь категории $S_{\text{категории}}$, м ²	Показатель емкости категории K_n , %
1	Объекты жилой застройки	1 311 865	61,73
2	Объекты обслуживания населения	242 703	11,42
3	Объекты научно-производственного назначения	570 450	26,85
Итого ($S_{\text{общ}}$)		2 125 018	100

Результаты анализа

В ходе исследования были выявлены соотношения площадей жилой застройки, объектов обслуживания и научно-производственных объектов для

действующих наукоградов с различной научной специализацией, но заданной численностью населения и иными условиями. Вычислив среднее арифметическое по каждой категории, получим усредненные показатели ε_n , %:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\sum K_1}{N} = \frac{52,50 + 51,52 + 59,51 + 60,72 + 63,47 + 61,73}{6} = 58,2; \\ \varepsilon_2 &= \frac{\sum K_2}{N} = \frac{14,40 + 7,58 + 11,87 + 7,47 + 12,26 + 11,42}{6} = 10,8; \\ \varepsilon_3 &= \frac{\sum K_3}{N} = \frac{33,10 + 40,90 + 28,62 + 31,81 + 24,27 + 26,85}{6} = 30,0,\end{aligned}$$

где ε_1 – усредненный показатель площадей жилой застройки; ε_2 – усредненный показатель площадей объектов обслуживания; ε_3 – усредненный показатель площадей объектов научно-производственной зоны.

Таким образом, усредненным соотношением объектов жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственной зоны для наукоградов является выявленное соотношение 58,2, 10,8 и 30,0 % соответственно. Максимальный интервал для жилой застройки составил не более 11 %, объектов обслуживания – 7 %, научно-производственных объектов – 16,5 %.

Выводы

Несмотря на различную специфику научных исследований, значительную разницу в размерах городских территорий и длительности формирования, наукограды обладают близким соотношением жилья, объектов обслуживания и научно-производственных площадей. Их усредненное соотношение стремится к значениям 60, 10 и 30 % соответственно. Принципиальная планировка научных городков не менялась, при этом наблюдался экономический, демографический рост и развитие научного сектора. Поэтому приведенное соотношение можно назвать оптимальным, проверенным временем и устойчивым.

Усредненные показатели возможно использовать для проектирования новых научных городков. Они позволяют сформировать требования к функционально-планировочной структуре на начальном этапе проектирования. Это необходимо, если подробное техническое задание отсутствует.

Полученное соотношение площадей объектов жилой застройки, объектов обслуживания и объектов научно-производственного сектора предлагается использовать при проектировании новых наукоградов. Для этого необходимо перевести полученное соотношение объектов в соотношение территорий под их реализацию. Для каждого проекта расчет территорий окажется индивидуальным, т. к. перевод соотношений будет осуществляться с использованием местных градостроительных регламентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Панов С.А., Пахомова Е.А., Пахомов А.В., Солодова Е.Н. Метод координатного диагностирования для сравнительного анализа социально-экономического развития наукоградов (на примере наукоградов Дубна Московской области и Обнинска Калужской области) // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 8. С. 17–30.

2. Ишкеева Ф.Ф., Озерова К.А., Ишкеева Г.Ф. Образ «Умного города» Иннополис: концепты и повседневность // Вестник Института социологии. 2021. № 2. 143–157.
3. *Иннополис* : презентация Федерального проекта города «Иннополис», 2013 г. : официальный сайт г. Иннополис. 25 слайдов. URL: <https://www.innopolis.com/city/history/> (дата обращения: 28.01.2022).
4. Марков М.Н., Григорьев В.А. ООО «Концепт-Проект» : исследовательская работа для развития зоны опережающего развития «Наукополис» Новосибирской агломерации. Т. II. Проект развития проектируемой территории. Ч. 5. Проект градостроительного развития зоны опережающего развития «Наукополис» Новосибирской агломерации. Новосибирск, 2019. 60 с.
5. Подольская Ю., Матвеева С., Безрук Е., Кириллов А., Фимушкина А., Салаткин Е., Калашникова Т., Скороходова Е., Ефимов А., Измestьева Ю., Бушев Ю. Концепция генерального плана иннограда Сколково, 2011. URL: <https://archi.ru/projects/russia/7857/innovatsionnyi-centr-skolovo-generalnyi-plan> (дата обращения: 08.11.2022 г.)
6. Долнаков П.А. Консалтинговая группа «Преимущество» /CG Advantage Стратегический мастер-план развития территорий СмартСити-Новосибирск, 2021. URL: <https://geofondnso.ru/projects/smartcity/> (дата обращения: 09.11.2022).
7. Чаплыгин Ю.М., Лях В.М., Горбунов П.Н., Канищев В.Г., Гришмановская С.А., Чаплыгин С.М. Градостроительная концепция развития «Академсити» 2022–2035 гг. 2022.
8. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2021 года // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 01.10.2022).
9. Чеченкина Т.В., Калужный К.А., Сотникова М.В. Современная научно-технологическая инфраструктура России // Российский научно-исследовательский институт экономики, политики и права в научно-технической сфере (РИЭПП). Москва : IMG Print, 2020. 64 с.
10. *Наукоград Протвино* : официальный сайт. URL: <https://protvino.ru/about/sciencecity?tab=tab7307> (дата обращения: 08.11.2022).
11. ФГБУ «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логанова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ) : официальный сайт. URL: <http://www.ihep.ru/pages/main/information/6585/> (дата обращения: 08.11.2022).
12. Лескова Н.Л. Ускорители прогресса // В мире науки. 2017. № 11. С. 116–123.
13. Российская Федерация. Правительство. О присвоении статуса наукограда Российской Федерации г. Пушкино (Московская область) : Постановление Правительства РФ от 27 октября 2005 г. № 642.
14. Пушинский научный центр биологических исследований : официальный сайт. URL: <https://www.pbcras.ru/about/> (дата обращения: 09.11.2022).
15. Российская Федерация. Президент. О присвоении статуса наукограда Российской Федерации г. Фрязино Московской области : Указ Президента Российской Федерации от 29 декабря 2003 года №1531.
16. Бобрышев А.Д., Усманова Т.Х., Чекаданова М.В. Методика оценки вариантов формирования инновационного кластера в наукограде // Инновации. 2019. № 5 (247). С. 69–79.
17. Российская Федерация. Правительство. О сохранении статуса наукограда Российской Федерации городскому округу Троицк (г. Москва) : Постановление Правительства Российской Федерации от 6 сентября 2017 года № 1073.
18. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ) : официальный сайт. URL: <https://www.triniti.ru/company/history/> (дата обращения: 09.11.2022).
19. Гвоздева А.А. Перспективы развития наукоградов и инновационных кластеров на примере наукограда Кольцово и биофармацевтического кластера Новосибирской области // Россия: тенденции и перспективы развития. 2022. № 17-3. С. 57–59.

REFERENCES

1. Panov S.A., Pakhomova E.A., Pakhomov A.V., Solodova E.N. Method of coordinate diagnostics for comparative analysis of socio-economic development of science cities (case studies of

- Dubna, Moscow region and Obninsk, Kaluga region). *Natsional'nye interesy: Prioritety i bezopasnost'*. 2012; (8): 17–30. (In Russian)
2. *Ishkineeva F.F., Ozerova K.A., Ishkineeva G.F.* The image of the "Smart City" Innopolis: Concepts and everyday life. *Vestnik Instituta sotsiologii*. 2021; (2): 143–157. (In Russian)
 3. Presentation of the City Federal Project "Innopolis" 2013. 25 p. Available: www.innopolis.com/city/history/ (accessed September 28, 2022). (In Russian)
 4. *Markov M.N., Grigor'ev V.A.* Research work of the advanced development zone "Naukopolis" in Novosibirsk, Vol. 2. Project for the territory development. Part 5. Novosibirsk, 2019. 60 p. (In Russian)
 5. *Podol'skaya Yu., Matveeva S., Bezruk E., et al.* The concept of the master plan for the Skolkovo innovation city. Available: <https://archi.ru/projects/russia/7857/innovacionnyi-centr-skolkovo-generalnyi-plan> (accessed November 8, 2022). (In Russian)
 6. *Dolnakov P.A.* Strategic master plan for the development of smart city. Available: <https://geofondns.ru/projects/smartcity/> (accessed November 9, 2022). (In Russian)
 7. *Chaplygin Yu.M., Lyakh V.M., Gorbunov P.N., Kanishchev V.G., Grishmanovskaya S.A., Chaplygin S.M.* Urban development concept of Academcity in 2022–2035. 2022. (In Russian)
 8. Federal state statistics service: Population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2021. Available: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (accessed October 1, 2022). (In Russian)
 9. *Chechenkina T.V., Kalyuzhnyi K.A., Sotnikova M.V.* Modern scientific and technological infrastructure of Russia. Moscow, 2020. 64 p. (In Russian)
 10. Protvino science city. Available: <https://protvino.ru/about/sciencecity?tab=tab7307> (accessed November 8, 2022). (In Russian)
 11. Logunov Institute of High Energy Physics. Available: www.ihep.ru/pages/main/information/6585/ (accessed November 8, 2022); (In Russian)
 12. *Leskova N.L.* Progress accelerators. *V mire nauki*. 2017; (11): 116–123. (In Russian)
 13. Decree N 642 of the Russian Federation "Assignment of the Russian science city status to Pushchino town in the Moscow Region", October 27, 2005. (In Russian)
 14. Pushchino science center for biological research. Available: www.pbcra.ru/about/ (accessed November 9, 2022). (In Russian)
 15. President's Decree No. 1531 "Assignment of the Russian science city status to Fryazino in the Moscow Region", December 29, 2003. (In Russian)
 16. *Bobryshev A.D., Usmanova T.Kh., Chekadanova M.V.* Assessment of innovation cluster in a science city. *Innovatsii*. 2019; (5): 247 p. (In Russian)
 17. Government Decree No. 1073 of the Russian Federation "On maintaining the Russian science city status to Troitsk (Moscow)", September 6, 2017 (In Russian)
 18. Troitsk Institute of Innovative and Thermonuclear Research. Available: www.trinit.ru/company/history (accessed November 9, 2022). (In Russian)
 19. *Gvozdeva A.A.* Development prospects of science cities and innovation clusters in Koltsovo and biopharmaceutical cluster of the Novosibirsk region]. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya*. 2022; (17-3): 57–59. (In Russian)

Сведения об авторе

Малова Екатерина Денисовна, магистрант, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, 630099, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, e.malova22@mail.ru

Author Details

Ekaterina D. Malova, Graduate Student, Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, e.malova22@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2023
Одобрена после рецензирования 26.04.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 15.02.2023
Approved after review 26.04.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 81–95.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 81–95.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.035.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-81-95

EDN: JXFROA

ТРАДИЦИИ КЛАССИЦИЗМА В ДЕРЕВЯННОЙ ЗАСТРОЙКЕ ГОРОДА ТЮМЕНИ ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XIX – НАЧАЛА XX ВЕКА. МАТЕРИАЛЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Виктория Викторовна Югай, Елена Владимировна Ситникова

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

Аннотация. Проведен анализ исторической классицистической застройки г. Тюмени на основе натуральных исследований в сентябре – октябре 2022 г. Тюмень была основана в 1586 г., являлась крупным торговым центром и имела выгодное географическое положение. Индивидуальные особенности ландшафта, а также этнографические и социальные условия придали Тюмени своеобразный облик. Исследуемая деревянная застройка г. Тюмени относится ко второй половине XIX – началу XX в.

Актуальность исследования обусловлена большим процентом утраты этой части застройки, сохранившиеся здания являются редкими объектами и подлежат выявлению, изучению и сохранению.

Цель исследования: выявить сохранившиеся объекты деревянной застройки второй половины XIX – начала XX века в стиле классицизм в г. Тюмени, провести их архитектуроведческий и типологический анализ.

Научная новизна заключается в проведенных натуральных исследованиях застройки в стиле классицизм в г. Тюмени, в собранных и проанализированных материалах, которые в совокупности с анализом застройки формируют базу для дальнейших исследований деревянных объектов классицизма.

Практическая значимость состоит в возможности использования полученных данных при подготовке лекций, докладов и сообщений по истории архитектуры Сибири.

В результате проведенного исследования создан комплекс материалов, фиксирующих актуальное состояние деревянной застройки в стиле классицизм г. Тюмени, включая материалы исторической и современной фотофиксации, а также дано описание объектов.

Ключевые слова: застройка Тюмени, деревянное зодчество, классицизм в деревянной застройке, Западная Сибирь, натурные исследования

Для цитирования: Югай В.В., Ситникова Е.В. Традиции классицизма в деревянной застройке города Тюмени второй половины XIX – начала XX века. Материалы натуральных исследований // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 81–95. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-81-95. EDN: JXFROA

ORIGINAL ARTICLE

**CLASSICISM IN TYUMEN WOODEN ARCHITECTURE
LATE IN THE 19TH AND EARLY 20TH CENTURIES.
FIELD RESEARCH****Victoria V. Yugai, Elena V. Sitnikova***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. Purpose: To find classical wooden buildings of the 19th and early 20th centuries in Tyumen.

Methodology: Architectural and typological analyses of wooden buildings of the 19th and early 20th centuries.

Research findings: The materials are developed concerning the current state of the classical wooden buildings in Tyumen, including historical and modern photographs and description of such buildings.

Practical implication: The obtained results can be used to prepare lectures, reports and communications on the history of architecture in Siberia.

Value: The full-scale studies of classical buildings underlie further research of wooden objects of classicism.

Keywords: construction, wooden architecture, classicism, Western Siberia, field research

For citation: Yugai V.V., Sitnikova E.V. Classicism in Tyumen wooden architecture late in the 19th and early 20th centuries. Field research. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 81–95. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-81-95. EDN: JXFROA

Классицизм как стилевое направление в русском искусстве и архитектуре появляется в 60-е гг. XVIII в., однако в Западной Сибири архитектурные сооружения в стиле классицизм возводятся лишь в конце XVIII – начале XIX в. Это объясняется тем, что в силу удаленности региона одновременно следовать стилистическим тенденциям, характерным для Центральной России, было затруднительно, что обусловило значительную временную задержку в развитии стилизованных направлений [1].

Большое влияние на архитектуру первой половины XIX в. оказали «образцовые проекты», разработанные в Петербурге и ставшие обязательными для застройки всех провинциальных городов России [2]. Их значение состояло в том, чтобы в сжатые сроки преобразить облик городов, представлявших собой средневековую застройку крестьянского типа.

Особое место в архитектуре классицизма занимает деревянная классицистическая застройка. Изначально классицизм распространился на усадебные жилые дома, а затем проник в рядовую застройку. Его строгие формы и простые детали легко усваивались плотниками и деревенскими резчиками, четкое построение планов отвечало практическим нуждам мелкого поместья в той же мере, в какой оно отвечало запросам столицы, купеческой и барской усадьбы. Здесь произошел синтез народного зодчества с усадебно-городским

«ампиром», который дал столь характерные для русской архитектуры начала XIX в. произведения деревянной классики [3].

Градостроительным аспектам городов Западной Сибири и вопросам формирования городской среды посвящены труды В.Т. Горбачева, Н.П. Журина, С.П. Заварихина, В.А. Каменевой, Б.И. Оглы, Т.М. Степанской и др.

Вопросы истории формирования и развития деревянной архитектуры в Сибири, и в том числе Тюмени, рассмотрены в трудах архитекторов и искусствоведов Е. Ащепкова, М.С. Боцман, М.Ю. Гайдук (Пухляковой), А.И. Клименко, Е.М. Козловой-Афанасьевой, Н.В. Купряковой, Е.В. Ситниковой и др.

Настоящее исследование посвящено выявлению сохранившихся объектов деревянной застройки второй половины XIX – начала XX в., выполненной в традициях классицизма в г. Тюмени, анализу и систематизации их по объемно-планировочным характеристикам.

В первой половине XIX в. деревянные здания воспроизводили формы архитектуры классицизма, повторяя в общих чертах каменную застройку. Таких домов в Тюмени, как и в других исторических городах Сибири, сохранилось уже немного, т. к. большинство из них были либо перестроены к концу XIX в., либо сгорели, а на их месте появились нарядно украшенные образцы эклектики. Большой процент утрат классицистической деревянной застройки приходится и на советский период, когда не обладающие пышным декором постройки сносились как фоновые объекты, не имеющие ценности. Поэтому сохранившиеся до настоящего времени деревянные дома, выполненные в стиле классицизм, являются наиболее ранними и редкими постройками [4, 5].

В рамках выполнения магистерской диссертации по выявлению и изучению традиций классицизма в исторической деревянной застройке Тюмени второй половины XIX – начала XX в. в сентябре – октябре 2022 г. были проведены натурные исследования по выявлению сохранившихся зданий подобного типа. Всего выявлено 19 объектов, выполненных в традициях классицизма, которые можно разделить на следующие типы:

- 1) по объемно-пространственным характеристикам:
 - дома с мезонинами – 4 здания;
 - дома с щипцовыми крышами – 7;
 - дома с вальмовыми крышами – 8;
- 2) по материалу отделки наружных стен:
 - деревянные дома, оштукатуренные под камень, – 3 здания;
 - дома, обшитые профильной доской, – 13;
 - дома без обшивки – 3.

Дома с мезонинами. Дом с мезонином образно ассоциируется с усадебным дворянским миром эпохи классицизма. Однако во второй половине XIX – начале XX в. в жилой застройке Тюмени и других городов Тобольской губернии данный тип жилого дома получил распространение в среде высшей городской интеллигенции, в особенности купечества, как отражение особого социального статуса владельцев. Сегодня такие дома являются редкими объектами историко-культурного наследия и нуждаются в сохранении и реставрации [6].

В группу домов с мезонинами вошли: главный дом из усадьбы купца А.И. Колокольникова на ул. Челюскинцев, 1; дом Ф.И. Ушакова на ул. 25 Ок-

тября, 42/Орджоникидзе, 2; дом тюменского мещанина М.С. Керженцева на ул. Пристанской, 1.

Дом из усадьбы купца А.И. Колокольникова на ул. Челюскинцев, 1, представляет собой одноэтажный объем на кирпичном цокольном этаже с крестообразным мезонином, который по своей типологии и стилистике относится к позднему классицизму последней трети XIX в. [7].

Усадьба купца А.И. Колокольникова – одно из самых крупных сохранившихся до настоящего времени купеческих домовладений второй половины XIX – начала XX в. Ее площадь занимала обширный участок по ул. Иркутской (совр. ул. Челюскинцев) и выходила на ул. Садовую (совр. ул. Дзержинского). Усадьба находилась во владении сына тюменского купца Ивана Петровича Колокольникова – Антона Ивановича. От всего усадебного комплекса сохранились: жилой дом (ул. Челюскинцев, 1), здание конюшни (ул. Дзержинского, 6) и склад (ул. Челюскинцев, 16).

Первоначально дом имел почти квадратную композицию плана, но в 1904 г. он был увеличен деревянной пристройкой на каменном цоколе с жилыми помещениями с северо-восточной боковой стороны, в результате чего приобрёл Г-образную конфигурацию. Однако и ранее его композицию усложнял парадный вход, который выделен в самостоятельный угловой прируб со стороны ул. Иркутской (ул. Челюскинцев) [8].

В доме прослеживается эстетика стиля классицизм: фасады здания, обшитые тесом, разделены пилястрами и опоясаны карнизом с гладким фризом. Основным элементом внешнего декора служат оконные наличники с характерными крупными подоконными досками с глухой резьбой в виде лучистого «солнца» (рис. 1).

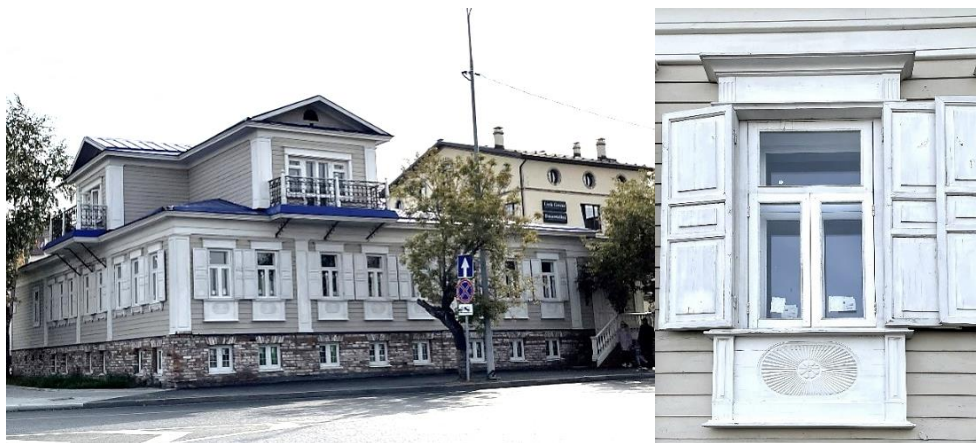


Рис. 1. Усадьба А.И. Колокольникова на ул. Челюскинцев, 1, в Тюмени. Общий вид дома и окно первого этажа. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 1. General view and window of the ground floor of the Kolokolnikov's estate on Chelyuskintsev Street in Tyumen. Photograph by V.V. Yugai

Сейчас усадьба является объектом культурного наследия регионального значения.

Еще один пример дома с мезонином – *полуторазтажнй деражняннй дом купца Ф.И. Ушакова*, расположенный на пересечении ул. Ишимской (совр. ул. Орджоникидзе) и Ильинской (совр. ул. 25 Октябрия). Дом построен в последней трети XIX в. и выполнен в формах позднего классицизма (рис. 2). В плане дом имеет крупный развитой шестистенок, а со стороны двора дополнен пристройкой с крыльцом и жилыми помещениями.



Рис. 2. Дом Ф.И. Ушакова на ул. Орджоникидзе, 2, в Тюмени. Главный фасад и деталь наличника. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 2. General view and ornamental detail of Ushakov's house on Ordzhonikidze Street in Tyumen. Photograph by V.V. Yugai

Фасады дома обшиты характерным тесом в виде ленточного руста, цокольный этаж выделен пояском. Оконные наличники первого этажа являются главным элементом фасада – они имеют характерную классицистическую композицию, а широкие подоконные доски украшены глухой резьбой в виде солярных символов. Карниз большого выноса и филенчатые пилястры создают четкое обрамление для наличников. Все окна, кроме окон на мезонине, по традиции имеют филенчатые ставни. Высокий мезонин с треугольным фронтоном служит строгим завершением общей композиции здания (рис. 2).

В планировочной структуре, с незначительными изменениями, сохранилась первоначальная анфиладная планировка. Убранство интерьеров утрачено [8]. Дом Ф.И. Ушакова является объектом культурного наследия регионального значения.

Дома с щипцовыми крышами. Тип домов с щипцовыми крышами был достаточно распространен в частной исторической застройке Тюмени. Это деревянные одноэтажные или полуторазтажные жилые дома в 3-4 оси окон по главному фасаду. Выявлено семь сохранившихся объектов такого типа: дом Дементьевых на ул. Хохрякова, 33; жилые дома на ул. Луначарского, 31, и ул. Свободы, 61/Полевая, 70. Четыре из них имеют нехарактерное для классицизма четное количество окон: усадьба тюменского врача А.Н. Климшина на ул. Фридриха Энгельса, 38; дом причта Михайло-Архангельской церкви на

гельской церкви на ул. Герцена, 17/Тургенева, 20; жилые дома на ул. Комсомольская, 27, и Казанская, 24.

Усадьба А.Н. Климшина – старинное домовладение с сохранившейся приусадебной территорией и садом, с 1901 г. принадлежавшая тюменскому врачу Арсению Николаевичу Климшину (рис. 3).



Рис. 3. Усадьба А.Н. Климшина на ул. Фридриха Энгельса, 38, в Тюмени. Общий вид и окно главного фасада. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 3. General view and window of Klimshin's estate on Friedrich Engels Street, Tyumen. Photograph by V.V. Yugai

Жилой одноэтажный деревянный дом на кирпичном цоколе построен в начале XX в. на Большой Городищенской улице (совр. ул. Фридриха Энгельса). Прямоугольный в плане объем, вытянутый в глубину двора под двускатной крышей, дополнен боковой пристройкой с парадным входом.

Декоративные элементы памятника имеют своеобразные интерпретации мотивов классицизма. Оконные наличники строгие, имеют профилированные карнизы-сандрики, которые завершены высокими прямоугольными досками, покрытыми глухой резьбой солярного орнамента. Фронтон отделан клинообразным тесом, расходящимся от полукруглого слухового окна. Входная группа оформлена козырьком на кованых ажурных кронштейнах.

До недавнего времени были сохранены ворота усадьбы, имевшие трехчастную схему. Их характерные черты – массивные столбы-устои, глухие полотнища из толстых тесин и сочетание монументальности конструкций с тонкими по исполнению деталями глухой резьбы, помещенной на пилястрах столбов (рис. 4).

Еще одним примером объекта с щипцовой крышей является *дом причта Михайло-Архангельской церкви*. Это жилой дом конца XIX в., который располагается на пересечении ул. Полицейской (совр. ул. Тургенева) и Ляминской (совр. ул. Герцена). Находился он во владении учителя Вознесенского приходского училища М.М. Чернавина.

Дом представляет собой двухэтажный деревянный прямоугольный в плане пятистенник, с крупным открытым срубом под двускатной крышей

и такой же рубленой пристройкой в два этажа со стороны бокового фасада. Наличники окон второго этажа имеют строгую прямоугольную форму с прямыми сандриками и широкими подоконными досками, на которых выполнена характерная для Тюмени глухая резьба с традиционным орнаментом – занавес с перехватами и кистями. Пропорции окон первого этажа более приземисты, наличники просты по форме и также имеют глухую резьбу и филенчатые ставни на первом и втором этажах. Тимпан фронтона крыши прорезан полукруглым слуховым окном и обшит досками в виде характерного орнамента «солнышко» (рис. 5).



Рис. 4. Ворота усадьбы А.Н. Климшина на ул. Фридриха Энгельса, 38, в Тюмени. Фото Валерия Усманова, 1985–1986 гг.

Fig. 4. Gates of Klimshin's estate on Friedrich Engels Street in Tyumen, 1985–1986. Photograph by V. Usmanov



Рис. 5. Жилой дом на ул. Тургенева, 20/Герцена, 17, в Тюмени. Фасад и фрагмент. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 5. Residential building on Turgeneva Street (now Gertsen Street) in Tyumen. Photograph by V.V. Yugai

Дом является объектом культурного наследия региональной категории и подлежит охране.

Дома с вальмовыми крышами. Дома с вальмовыми крышами были широко распространены в застройке Тюмени как доходный тип дома. Это полуторазтажные или двухэтажные деревянные дома в 5–9 осей окон по главному фасаду. К сохранившимся объектам с вальмовыми крышами относятся пять построек. Это дом А.Я. Капитановой на ул. Кирова, 37/Ленина, 37; дом Е.И. Брызгалова на ул. Челюскинцев, 13; дом М.П. Ядрышникова на ул. Челюскинцев, 20/Хохрякова, 18; дом причта Вознесенской церкви на ул. Берегова, 77А; жилой дом на ул. Ямской, 43.

Усадьба М.П. Ядрышникова располагается на пересечении ул. Иркутской (совр. ул. Челюскинцев) и Успенской (совр. ул. Хохрякова). Постройка относится к концу XIX – началу XX в. и включает в себя жилой дом, забор, ворота и амбар.

Жилой дом представляет собой двухэтажный прямоугольный в плане шестистенок, обшитый тесом и имеющий с бокового дворового фасада холодные сени с лестницей.

Художественная выразительность внешнего облика дома достигается пропорциональной слаженностью элементов фасада, убранством верхнего ряда оконных наличников с крупными подоконными досками, которые обработаны глухой резьбой тонкого растительного орнамента. Цокольный этаж имеет приземистые пропорции и прямоугольной формы наличники и ставни. Облик дома дополняют филенчатые пилястры и большой карниз с гладким подшивным фризом (рис. 6).



Рис. 6. Усадьба М.П. Ядрышникова на ул. Челюскинцев, 20/Хохрякова, 18. Общий вид и окно с наличником. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 6. General view and window of the Yadryshnikov's house on Chelyuskintsev Street (now Khokhryakova Street). Photograph by V.V. Yugai

Ворота имеют трехчастную систему с двумя боковыми калитками и широким центральным проездом. Фризы над калитками украшены графичной глу-

хой резьбой в виде характерного солярного орнамента. Забор линейно украшен аркатурой [8]. Также из усадебного комплекса сохранился амбар (рис. 7).



Рис. 7. Усадьба М.П. Ядрышникова на ул. Челюскинцев, 20/Хохрякова, 18. Ворота и амбар. Фото В.В. Югай и Е.В. Ситниковой, 2022 г.

Fig. 7. Gates and barn of Yadryshnikov's estate on Chelyuskintsev Street. Photograph by V.V. Yugai and E.V. Sitnikova

Усадьба является объектом культурного наследия региональной категории.

Еще один пример такого типа построек – дом А.Я. Капитановой – закрепляет угол квартала вблизи Спасской церкви. Расположен на пересечении ул. Спасской (совр. ул. Ленина) и Войновской (совр. ул. Кирова). Дом был возведен в конце XIX в., а в 1903 г. увеличен аналогичной пристройкой. В месте стыка объемов были сделаны сени со сквозным коридором, а с торца устроена деревянная галерея (рис. 8).



Рис. 8. Дом А.Я. Капитановой на ул. Кирова, 37/Ленина, 37. Фасад и фрагмент фасада по ул. Ленина. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 8. Facade and fragment of Kapitanova's House on Kirova and Lenin Streets. Photograph by V.V. Yugai

В облике дома прослеживаются явные признаки классицизма. Рубленый основной этаж обшит тесом в виде ленточного руста, углы и штыки бревен выделены филенчатыми пилястрами, охваченными строгим карнизом с глад-

ким фризом. Простые прямоугольные окна украшают несложные наличники с прямыми сандриками на объемных кронштейнах и геометрическими накладными деталями в виде пластин.

Дом является объектом культурного наследия регионального значения. В 2005 г. здание реконструировано по проекту Г.П. Бордакова с сохранением образно-стилистического характера фасадов.

Стоит отметить, что большинство деревянных зданий, выполненных в традициях классицизма, имеют обшивку профильной доской (13 зданий), реже встречаются дома без обшивки. Наиболее редки деревянные оштукатуренные дома. Внешне их трудно отличить от каменной застройки. Их выдает тонкий карниз, не ступенчатый, как у каменных домов, и небольшая толщина стен.

Деревянные дома, оштукатуренные под камень. До настоящего времени сохранилось всего три деревянных дома, оштукатуренных под камень: дом с мезонином П.Г. Катаева – М.Е. Дементьева по адресу ул. Советская, 21/Дзержинского, 26; жилой дом на ул. Дзержинского, 22; усадьба Колокольниковых на ул. Луначарского, 10.

Выразительным примером таких зданий является *дом с мезонином* на пересечении ул. Серебряковской (совр. ул. Советская) и Садовой (совр. ул. Дзержинского).

Дом был построен в середине XIX в. и принадлежал военному врачу Павлу Григорьевичу Катаеву, а около 1907 г. перешел к екатеринбургскому мещанину Михаилу Ефимовичу Дементьеву, управляющему Товариществом Западно-Сибирского пароходства и торговли, совладельцу чугунолитейного завода Н.Д. Машарова [8]. Среди деревянных жилых домов Тюмени памятник отличается композицией мезонинного типа и характером обработки деревянных фасадов, оштукатуренных под камень.

Полуторатажное на цокольном этаже здание имеет П-образную композицию в плане (рис. 9).



Рис. 9. Дом П.Г. Катаева – М.Е. Дементьева на ул. Советской, 21/Дзержинского, 26. Дворовой фасад. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 9. Katayev's and Dementiev's house on Sovetskaya Street. Photograph by V.V. Yugay

Парадный вход расположен в угловой части фасада с ул. Серебряковской (совр. Советская) и выделен лучковым аттиком, остальные входы размещены со двора. Большой мезонин с широким, далеко выступающим балконом придает дому своеобразный облик. Балкон поддерживается двумя кронштейнами и несет, кроме того, колонны, антаблемент и крышу с треугольным «разорванным» фронтоном. Также интересным элементом является штукатурная измельченная отделка фасадов: рустовка углов, рамочные, мелко профилированные обрамления окон, межоконные фигурные филенки, пояски, широкий фриз с подкарнизными кронштейнами.

Все декоративные элементы имеют характерные черты классицизма, но в их сочетании, насыщенности и дробной композиции сказывается влияние эклектики. Особый шарм дому придают венчающий карниз парапет из балясин и круглые вазоны на постаментах (рис. 10).



Рис. 10. Дом П.Г. Катаева – М.Е. Дементьева на ул. Советской, 21/Дзержинского, 26. Общий вид и парадный вход. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 10. General view and entrance of Katayev's and Dementiev's house on Sovetskaya Street. Photograph by V.V. Yugai

Планировка дома имеет коридорную систему и в основном сохранилась. После реконструкции памятника в 2007 г. по проекту архитектора Г.М. Дубоноса деревянные несущие стены заменены на кирпичные, в результате пропорции здания значительно изменены. Оно стало выше, оконные проемы первого этажа мельче, расстояние до окон цокольного этажа стало больше и пр. Первоначальные пропорции дома можно увидеть на фото 1960-х гг. (рис. 11). Дом является объектом культурного наследия региональной категории и охраняется государством.

Еще один объект, оштукатуренный под камень, – дом из усадьбы Колокольниковых на ул. Никольской (совр. ул. Луначарского, 10) (рис. 12). Во владении Ивана Петровича Колокольниковых эта усадьба находилась с 1880-х гг. В начале XX в. она занимала значительную часть по ул. Никольской. Усадьба выполняла не только жилую функцию, но и общественную. На ее территории была возведена частная народная школа Колокольниковых [8].



Рис. 11. Дом П.Г. Катаева – М.Е. Дементьева на ул. Советской, 21, до реконструкции. Фото 1960-х гг. (URL: <https://pastvu.com/p/246494>)

Fig. 11. Katayev's and Dementiev's house on Sovetskaya Street before reconstruction, 1960s.



Рис. 12. Дом из усадьбы Колокольниковых на ул. Луначарского, 10. Общий вид и деталь наличника. Фото В.В. Югай, 2022 г.

Fig. 12. The Kolokolnikovs' house on Lunacharskii Street. Photograph by V.V. Yugai

Дом по ул. Луначарского, 10, выстроен в конце XIX в. Здание воспринимается как полностью каменное, однако второй этаж – деревянный, оштукатуренный под камень. Архитектура дома отражает переход от позднего классицизма к эклектике. В членении плоскостей фасадов применены под-

оконные пояски с прямоугольными филенками, профилированный междуэтажный карниз. Окна фасадов оформлены лепными наличниками, завершающимися сандриками: верхние имеют лучковую форму, нижние – прямую, горизонтальную.

Усадьба является выявленным объектом культурного наследия.

В результате проведенных натурных исследований было выявлено 19 объектов, возведенных во второй половине XIX – начале XX в. в традициях классицизма в г. Тюмени. Представленные объекты были разделены на две типологические группы:

1) по объемно-пространственным характеристикам:

- дома с мезонинами (4 объекта);
- дома с щипцовыми крышами (7 объектов);
- дома с вальмовыми крышами (8 объектов);

2) по материалу отделки наружных стен:

- деревянные дома, оштукатуренные под каменные (3 объекта);
- дома, обшитые профильной доской (13 объектов);
- дома без обшивки (3 объекта).

При анализе деревянных классицистических домов в г. Тюмени были выявлены традиционные классицистические черты:

- симметрия главного фасада и нечетное количество осей окон;
- нижний этаж выполнен в виде цокольного либо имеет пониженную этажность, а окна этого этажа отличает более простая композиция наличников;
- в композиционном решении применяются фронтоны, мезонин, обшивка тесом в виде ленточного руста, профилированный карниз большого выноса, сандрики, мутулы и филенчатые пилястры.

Кроме того, были определены особенности деревянных классицистических зданий, характерные для Тюмени:

- лучевая обшивка фронтонов домов с щипцовыми крышами;

- наличие четного количества оконных осей;

- окна как первого, так и второго этажей нередко со ставнями, наличники с широкой подоконной доской, украшенной глухой резьбой;

- самый распространенный орнамент – солярный.



Все объекты располагаются в исторических районах города, около половины домов являются объектами культурного наследия и подлежат охране государством.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Купрякова Н.В., Боцман М.С.* Классицизм в архитектуре западносибирских городов второй половины XVIII – начала XIX в. // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. 2015. № 12 (62): в 4 ч. Ч. II. С. 124–127. ISSN 1997-2911.
2. *Жученко Б.А., Заварихин С.П.* Тюмень архитектурная. Свердловск : Средне-Уральское книжное издательство, 1984. 240 с.
3. *Ситникова Е.В.* Деревянный классицизм г. Томска // Региональные архитектурно-художественные школы. 2013. № 1. С. 305–309. EDN: SCBQOX
4. *Пухлякова М.Ю., Ситникова Е.В.* Деревянная архитектура Тюмени конца XIX – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 32–46. EDN: YPMQCG
5. *Babinovich N.U., Sitnikova E.V.* Features of wooden buildings in Tomsk // Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, 09–10 March 2021 year. V. 1926. Belgorod : IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012042. DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012042. EDN: PRQQYR
6. *Гайдук М.Ю., Клименко А.И., Порошин О.С.* Дома с мезонином в жилой застройке городов Тюменской области как объекты историко-культурного наследия (вторая половина XIX – начало XX в.) // Общество: философия, история, культура. 2021. № 1 (81). С. 83–92.
7. *Ситникова Е.В.* Историко-архитектурное наследие купцов Колокольниковых в г. Тюмени // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (51). С. 36–48. EDN: UDKOMP
8. *Козлова-Афанасьева Е.М.* Архитектурное наследие Тюменской области. Тюмень : ООО «Издательство Искусство», 2008. 488 с.

REFERENCES

1. *Kupryakova N.V., Botsman M.S.* Classicism in architecture in towns of Western Siberia late in the 18th and early 19th centuries. *Istoricheskie, filosofskie, politicheskie i yuridicheskie nauki, kul'turologiya i iskusstvovedenie. Voprosy teorii i praktiki*. 2015; 12-2 (62): 124–127. (In Russian)
2. *Zhuchenko B.A., Zavarikhin S.P.* Tyumen architectural. Sverdlovsk, 1984. 240 p. (In Russian)
3. *Sitnikova E.V.* Wooden classicism in Tomsk. *Regional'nye arkhitekturno-khudozhestvennye shkoly*. 2013; (1): 305–309. EDN: SCBQOX (In Russian)
4. *Pukhlyakova M.Yu., Sitnikova E.V.* Wooden architecture of Tyumen late in the 19th and early 20th centuries. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20 (1): Pp. 32–46. (In Russian)
5. *Babinovich N.U., Sitnikova E.V.* Features of wooden buildings in Tomsk. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1926; 012042. DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012042. EDN: PRQQYR
6. *Gaiduk M.Y., Klimenko A.I., Poroshin O.S.* Mezzanine houses in the residential buildings in the Tyumen Region as objects of historical and cultural heritage (19–20th centuries), Khors, 2021, Pp. 83–92. (In Russian)
7. *Sitnikova E.V.* Merchants Kolokol'nikov's historical and architectural heritage in Tyumen. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (4): 36–48. (In Russian)
8. *Kozlova-Afanas'eva E.M.* Architectural heritage in the Tyumen region. Tyumen, 2008. 488 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Югай Виктория Викторовна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; ассистент-стажер, Тю-

менский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, uvvictory99@gmail.com

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

Authors Details

Victoria V. Yugai, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, uvvictory99@gmail.com

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 09.02.2023
Одобрена после рецензирования 17.02.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 09.02.2023
Approved after review 17.02.2023
Accepted for publication 16.05.2023

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 96–111.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 96–111.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.04, 534.121.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-96-111

EDN: IBTUVQ

ИССЛЕДОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН

**Николай Анатольевич Морозов², Григорий Иванович Гребенюк¹,
Владислав Иванович Максак¹, Александр Александрович Гаврилов²**

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

²Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

Аннотация. Исследовались собственные колебания прямоугольных металлических пластин. Актуальность исследования обусловлена широтой применения данных структурных элементов конструкций.

Для определения частот собственных колебаний применялись *расчетные методы*, в частности *аналитический расчет* и *расчет методом конечных элементов*. За основу аналитического расчета было принято уравнение движения тонкой прямоугольной пластины. Затем применялся *асимптотический метод*, учитывающий динамический краевой эффект. В результате были определены частоты собственных колебаний пластины. Расчет по методу конечных элементов проводился в двух программных комплексах: «Лира» и SolidWorks. Была создана твердотельная модель пластины с датчиками, с помощью которой были рассчитаны частоты собственных колебаний, определены коэффициенты массового участия.

Для подтверждения правильности результатов аналитических расчетов проводились экспериментальные исследования колебаний прямоугольных пластин на вибростенде. Использовался метод плавного изменения частоты синусоидальных колебаний. По значениям амплитуд виброускорений датчиков были построены спектральные графики колебаний пластины.

В результате выявлены определенные расхождения в значениях частот собственных колебаний в зависимости от применяемого метода. В исследовании не принимались во внимание частоты с малым коэффициентом массового участия.

Ключевые слова: колебания, пластина, частота, вибростенд, метод конечных элементов

Для цитирования: Морозов Н.А., Гребенюк Г.И., Максак В.И., Гаврилов А.А. Исследования собственных колебаний прямоугольных пластин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 96–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-96-111. EDN: IBTUVQ

ORIGINAL ARTICLE

FREE VIBRATIONS OF RECTANGULAR PLATES

Nikolai A. Morozov², Grigorii I. Grebenyuk¹,
Vladislav I. Maksak¹, Aleksandr F. Gavrilov²

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

²Orenburg State University, Orenburg, Russia

Abstract. The paper investigates free vibrations of rectangular metal plates. The finite element method and analytical calculation are particularly used to determine the vibration frequency. The analytical calculation is based on the equation of motion of a thin rectangular plate. The asymptotic method is applied to determine the dynamic edge effect. As a result, the free vibration frequency is determined for the rectangular metal plate. The finite element analysis is performed in Lira and SolidWorks software packages. For this, a solid plate model with sensors is created to measure the free vibration frequency; the effective mass participation factor was determined.

The plate vibration tests were conducted to confirm the results of analytical calculations. The method of smooth sinusoidal vibrations is used. Spectrum graphs of the plate vibrations are suggested based on the vibration acceleration of sensors. Errors are identified in the free vibration frequencies depending on the applied method. The paper does not consider frequencies with the low effective mass participation factor.

Keywords: vibrations, plate, frequency, effective mass participation factor, vibration table, finite element method

For citation: Morozov N.A., Grebenyuk G.I., Maksak V.I., Gavrilov A.A. Free vibrations of rectangular plates. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 96–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-96-111. EDN: IBTUVQ

Введение

Тонкостенные конструкции широко применяются в промышленном и гражданском строительстве, а также в машиностроении и других отраслях. Это обусловлено их высокой прочностью и легкостью. Одним из видов тонкостенных конструкций являются различные пластинчатые конструкции. Задачей механики тонкостенных конструкций является совершенствование методов расчета и проектирования данных конструкций, в частности исследования колебаний пластин.

Аналитические исследования колебаний пластин проводились учеными с помощью различных подходов. Наиболее точные результаты дает рассмотрение колебаний пластины в качестве трехмерной задачи теории упругости. Данный подход дает возможность получать достаточно точные значения собственных частот колебаний, тем не менее математические трудности ограничивают его практическое применение [1].

Наиболее распространенной является классическая теория пластин Кирхгофа – Лява, которая используется для тонких пластин, находящихся под

действием нагрузок при малых изгибах. В этой теории приняты допущения о том, что прямые линии, перпендикулярные срединной поверхности, остаются прямыми и нормальными к срединной поверхности после деформации, а толщина пластины не изменяется. Поскольку влиянием деформации сдвига и инерции вращения пренебрегают, данная теория завышает жесткость и значения собственных частот пластин. Эти завышения наиболее характерны для толстых пластин и собственных частот мод высокого порядка. Поэтому теорию пластин Кирхгофа – Лява, как правило, применяют при определении собственных частот мод низкого порядка [2].

Для исследований колебаний пластин средней толщины применяются теории Рейсснера и Уфлянда – Миндлина, допускающие деформации сдвига первого порядка [3].

В связи с широким применением пластин, исследования их колебаний остаются весьма актуальными [4, 5, 6]. Ряд ученых исследуют влияние добавленных точечных масс на параметры колебаний. Так, в работе [7] были получены нелинейные функции частотной характеристики, основанные на итерационном численном решении набора нелинейных алгебраических уравнений, что позволило получить оптимальную динамическую модель прямоугольных пластин с добавленной массой. В исследовании [8] проанализировано влияние значения и положения дополнительной сосредоточенной массы на вибрационные характеристики консольных трапецевидных пластин.

Проводятся исследования влияния вырезов и геометрических дефектов пластин на параметры их свободной вибрации [9], изучаются колебания пластин переменной толщины [10].

Актуальны исследования колебаний пластин, имеющих упруго закрепленные края. В работе [11] получено полуаналитическое решение для свободной поперечной вибрации многоугольных изотропных тонких пластин произвольной формы. Для определения перемещений точек многоугольных пластин использовались ряды полиномов Чебышева, для получения собственных частот и форм мод применялся метод Ритца. Авторами предлагается унифицированная процедура для устранения нежелательных вибраций многоугольных пластин. В статье [12] рассматривалось исследование свободных колебаний прямоугольных пластин, два края которых свободно оперты, а два других края закреплены упруго. Был использован метод Рэлея – Ритца, а также решены аналитические уравнения колебаний.

Аналитический расчет

Рассматривались колебания тонкой прямоугольной пластины. Уравнение движения такой пластины [2] имеет вид

$$\nabla^2 \nabla^2 \zeta + \frac{m_0}{D} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – бигармонический оператор; ζ – прогиб пластины;

$m_0 = \rho h$ – масса единицы площади пластины; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндриче-

ская жесткость; h – толщина пластины; ρ, E, μ – плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала пластины.

Решение (1) ищется в виде

$$\zeta = w(x, y) \cos vt, \quad (2)$$

где $w(x, y)$ – амплитудная функция; v – частота колебаний.

В дальнейшем использовался асимптотический метод [13], который учитывает динамический краевой эффект. Тогда амплитудная функция представляет собой сумму

$$w(x, y) = C_0 \cos \gamma_1 x \cos \gamma_2 y + C_1 e^{-\alpha_1 \left(\frac{a}{2} \pm x\right)} \cos \gamma_2 y + C_2 e^{-\alpha_2 \left(\frac{b}{2} \pm y\right)} \cos \gamma_1 x, \quad (3)$$

где a, b – размеры пластины; C_0, C_1, C_2 – постоянные; $\gamma_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}, \gamma_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$ – величины, обратные длинам волн в двух направлениях; $\alpha^2 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2$; $\alpha_1^2 = \alpha^2 + \gamma_2^2$; $\alpha_2^2 = \alpha^2 + \gamma_1^2$.

Динамический краевой эффект заключается в том, что условия закрепления влияют на форму колебаний всей системы и создают условия для реализации этих форм в процессе колебаний.

Частота колебаний определяется формулой

$$v = \alpha^2 \sqrt{\frac{D}{m_0}}. \quad (4)$$

Для пластины, защемленной по периметру, условия закрепления принимают вид:

$$\text{при } x = \pm \frac{a}{2}: w = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0, C_2 = 0; \quad (5)$$

$$\text{при } y = \pm \frac{b}{2}: w = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0, C_1 = 0. \quad (6)$$

Тогда, подставляя (5) в (3):

$$\begin{aligned} C_0 \cos \frac{\gamma_1 a}{2} + C_1 &= 0; \\ C_0 \gamma_1 \sin \frac{\gamma_1 a}{2} - C_1 \alpha_1 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Частотное уравнение принимает вид

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_1 a}{2} \right) = -\sqrt{1 + 2\gamma^2}, \quad (8)$$

где $\gamma = \gamma_2 / \gamma_1$.

Аналогично для условий (6):

$$C_0 \cos \frac{\gamma_2 b}{2} + C_2 = 0; \quad (9)$$

$$C_0 \gamma_2 \sin \frac{\gamma_2 b}{2} - C_2 \alpha_2 = 0;$$

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_2 b}{2} \right) = - \sqrt{1 + \frac{2}{\gamma^2}}. \quad (10)$$

Так как длины волн являются действительными числами, то должны выполняться условия:

$$\frac{4i-3}{2a} \pi \leq \gamma_1 \leq \frac{4i-1}{2a} \pi; \quad (11)$$

$$\frac{4j-3}{2b} \pi \leq \gamma_2 \leq \frac{4j-1}{2b} \pi, \quad (12)$$

где $i, j = 1, 2, \dots$

При определении частоты последовательно решаются уравнения (8), (10) с определением коэффициентов, входящих в диапазоны (11), (12), а затем находится частота по формуле (4).

Расчеты произведены для прямоугольной стальной пластины размером 0,48×0,68 м, толщиной 2 мм. Определялась частота колебаний. Результаты занесены в табл. 1.

Таблица 1

Значения частоты ν , с^{-1}

Table 1

Frequency ν , s^{-1}

i	j	γ_1	γ_2	ν
1	1	9,23	5,75	368,76
	2	7,88	15,88	980,30
	3	7,38	25,29	2166,31
2	1	22,81	5,07	1703,81
	2	22,24	15,06	2251,30
	3	21,65	24,75	3374,66
3	1	35,96	4,90	4110,08
	2	35,70	14,66	4646,79
	3	35,32	24,31	5736,55

Первые три диапазона по (11): 2,62–7,85; 13,09–18,33; 23,56–28,80.

Первые три диапазона по (12): 1,96–5,89; 9,81–13,74; 17,67–21,60.

Расчет методом конечных элементов

Для расчета использовалась программа SolidWorks. Дополнительно применялся программный комплекс «Лира». На рис. 1 показана схема пластины с точечными массами, соответствующими датчикам. На рис. 2 и 3 приведены коэффициенты массового участия, для которых определены формы колебаний, имеющие достаточный коэффициент массового участия (рис. 4–13).

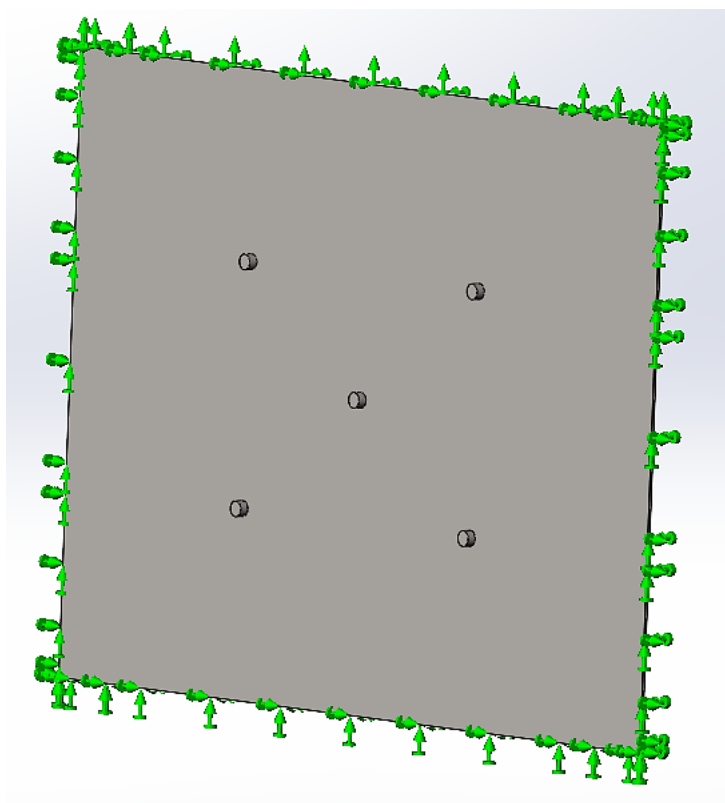


Рис. 1. Пластина с датчиками
Fig. 1. Plate with sensors

Частота в сравнении с действительным коэффициентом массового участия (EMPF)

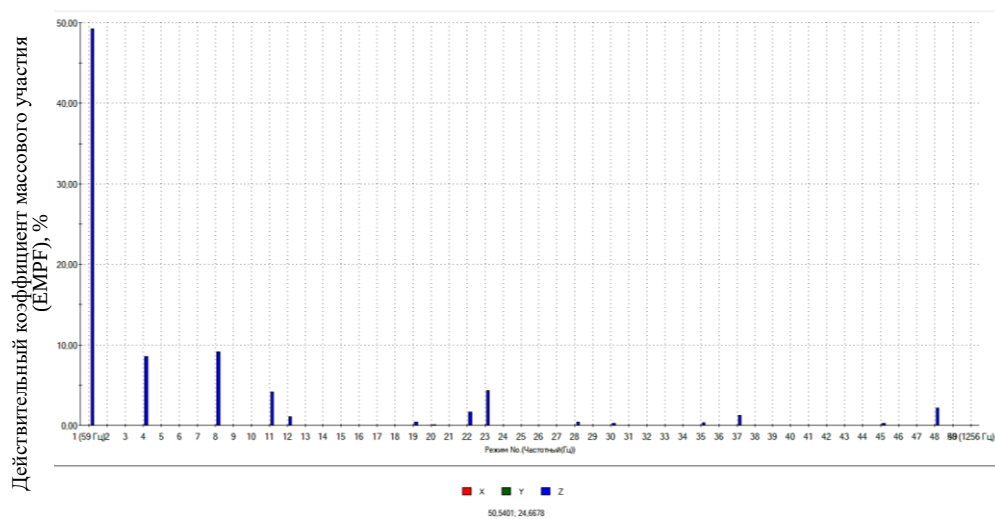


Рис. 2. Коэффициент массового участия
Fig. 2. Effective mass participation factor

Частота в сравнении с результирующим действительным коэффициентом массового участия (СЕМРФ)

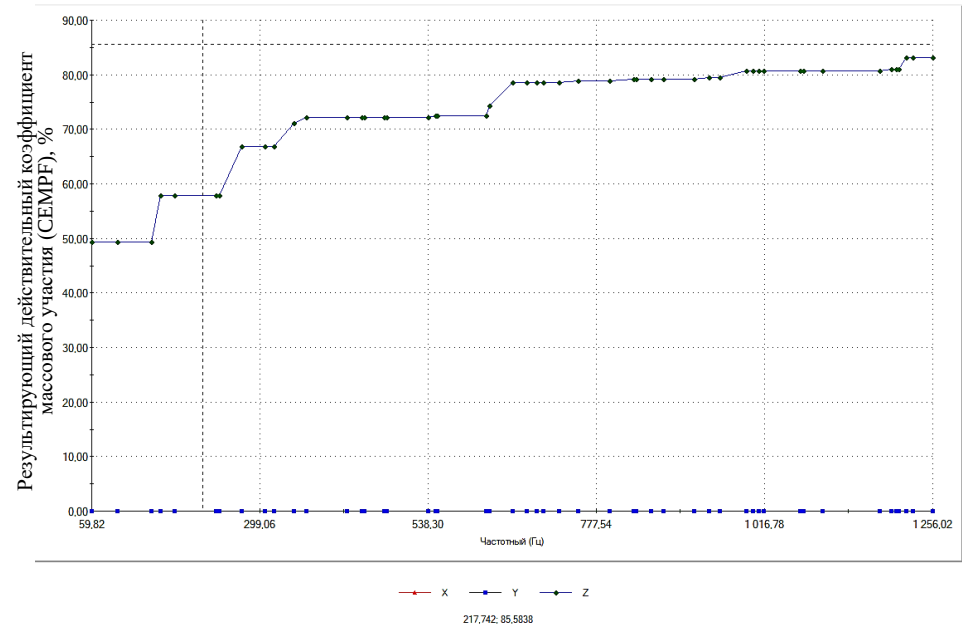


Рис. 3. Результирующий коэффициент массового участия
Fig. 3. Resulting mass participation factor

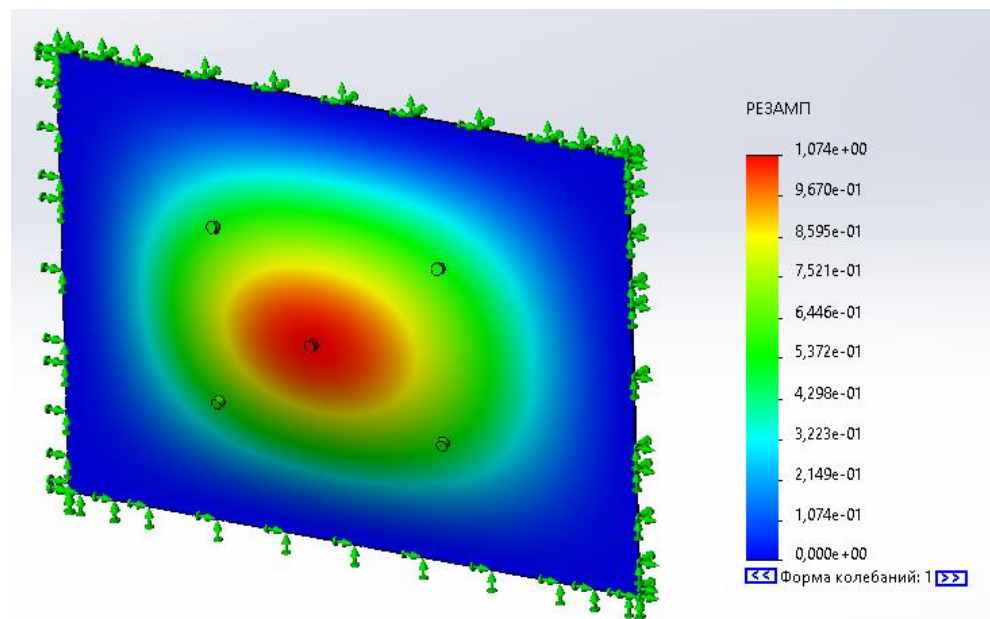


Рис. 4. 1-я форма колебаний (59,826 Гц)
Fig. 4. Fundamental vibrations (59.826 Hz)

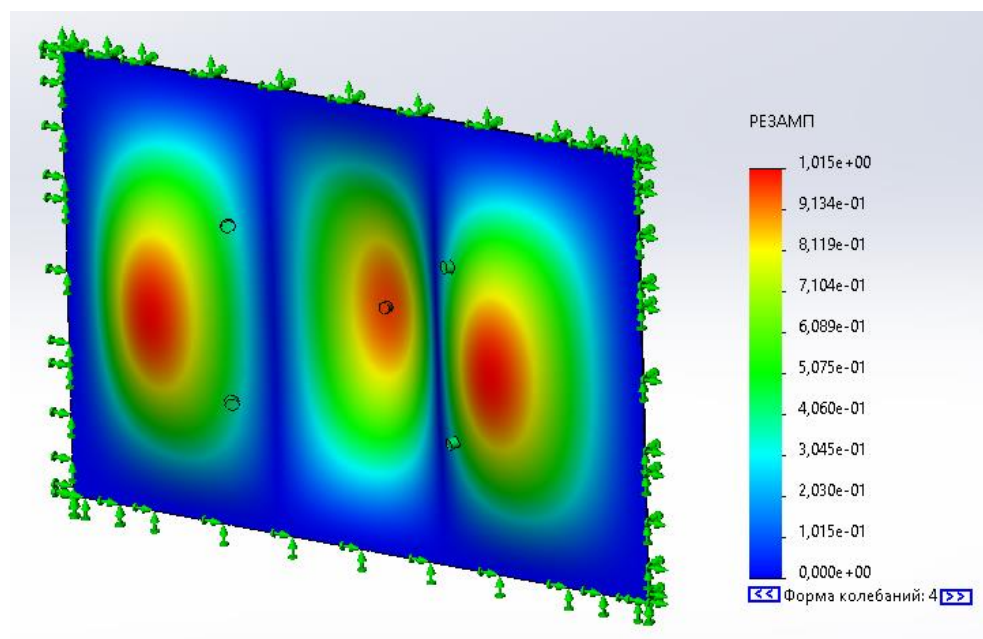


Рис. 5. 4-я форма колебаний (157,68 Гц)
Fig. 5. Fourth vibration mode (157.68 Hz)

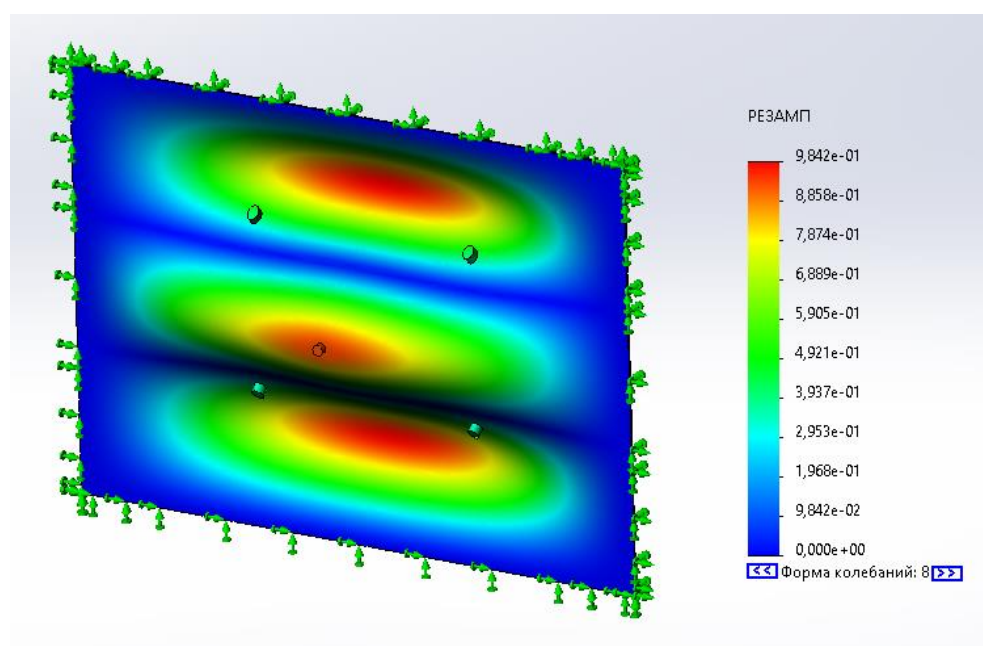


Рис. 6. 8-я форма колебаний (272,63 Гц)
Fig. 6. Eighth vibration mode (272.63 Hz)

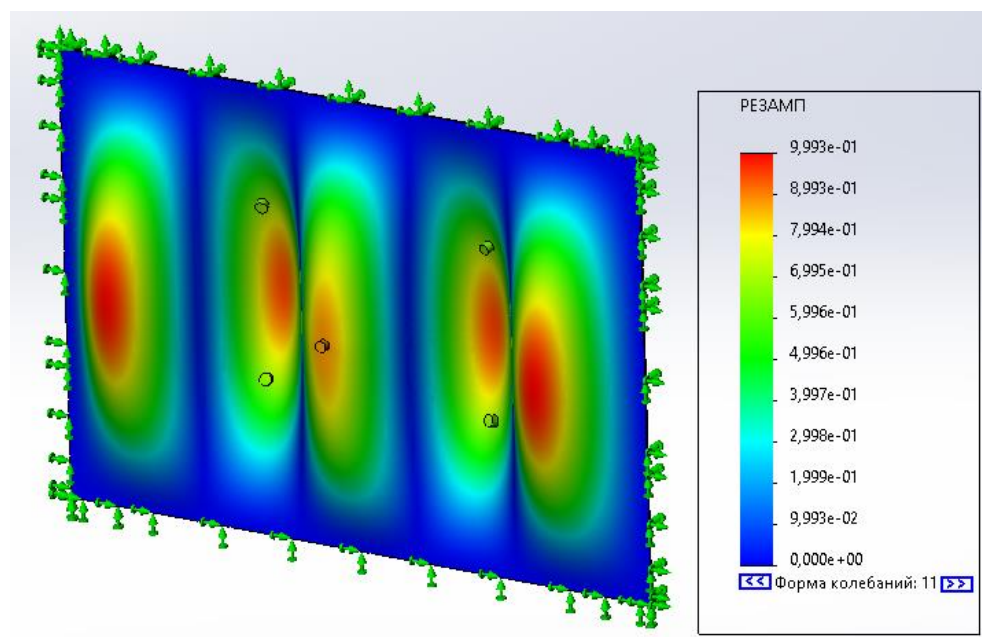


Рис. 7. 11-я форма колебаний (347,05 Гц)
Fig. 7. Eleventh vibration mode (347.05 Hz)

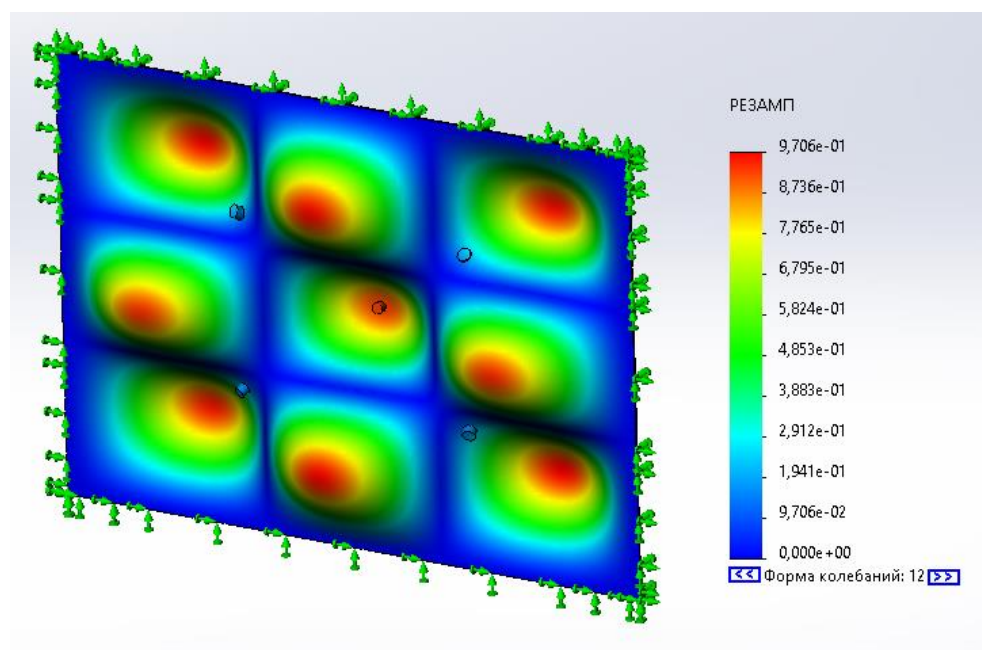


Рис. 8. 12-я форма колебаний (365,13 Гц)
Fig. 8. Twelfth vibration mode (365.13 Hz)

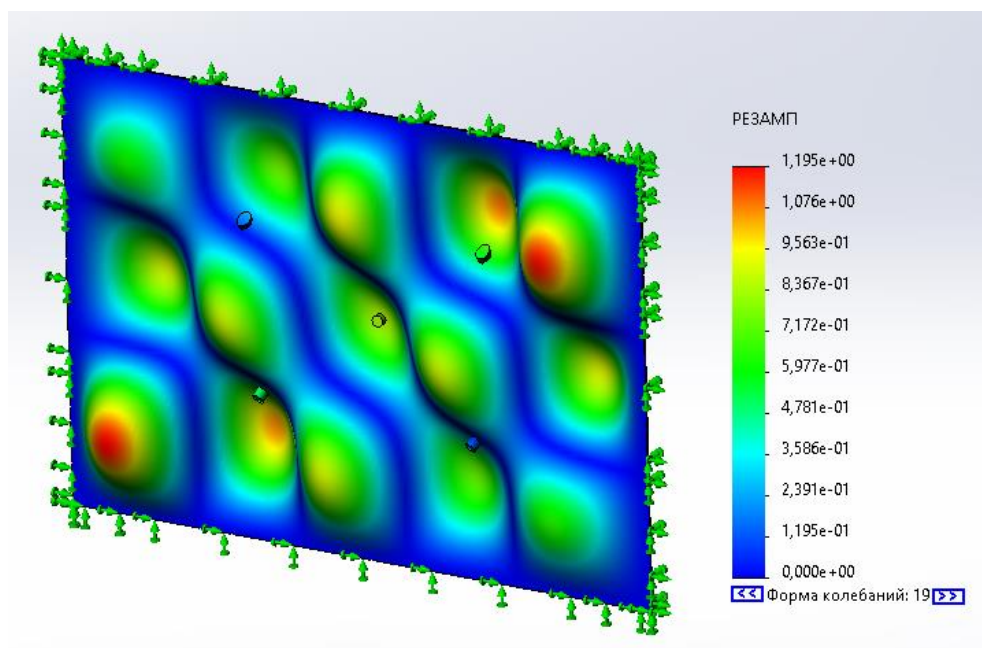


Рис. 9. 19-я форма колебаний (548,78 Гц)
Fig. 9. Nineteenth vibration mode (548.78 Hz)

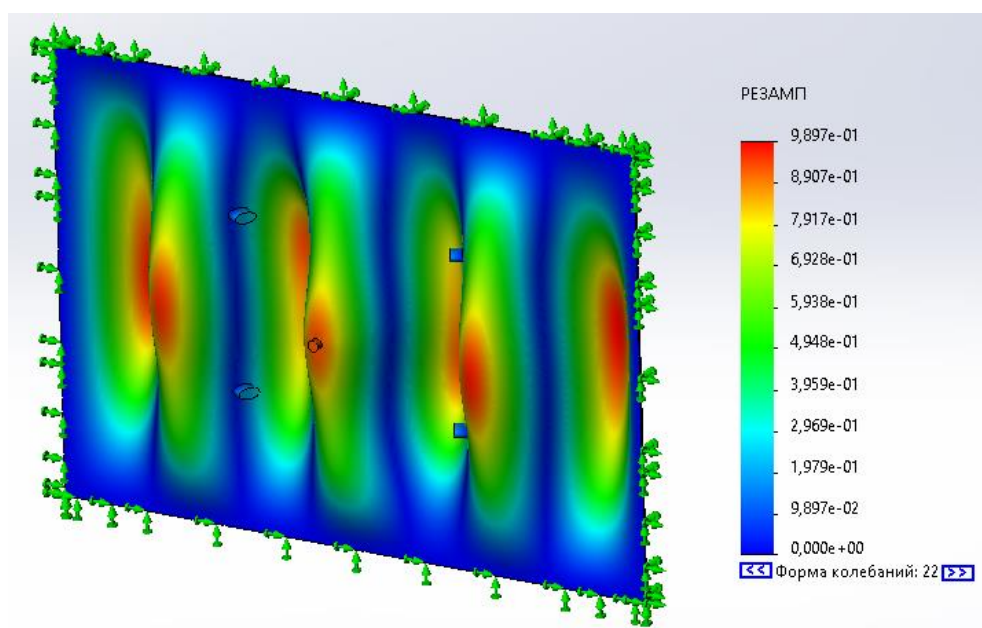


Рис. 10. 22-я форма колебаний (624,94 Гц)
Fig. 10. 22nd vibration mode (624.94 Hz)

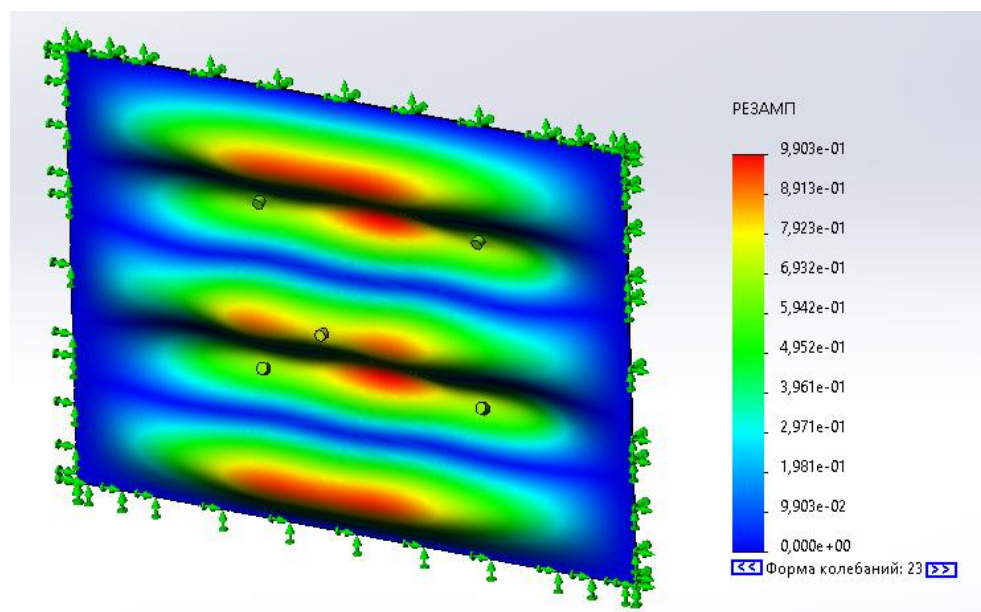


Рис. 11. 23-я форма колебаний (658,6 Гц)
Fig. 11. 23rd vibration mode (658.6 Hz)

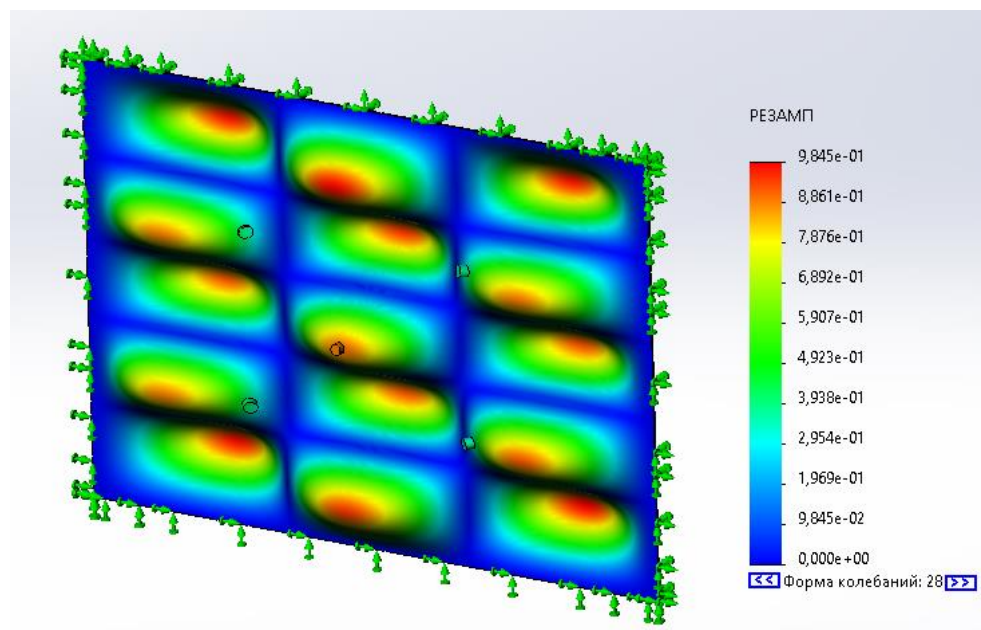


Рис. 12. 28-я форма колебаний (751,85 Гц)
Fig. 12. 28th vibration mode (751.85 Hz)

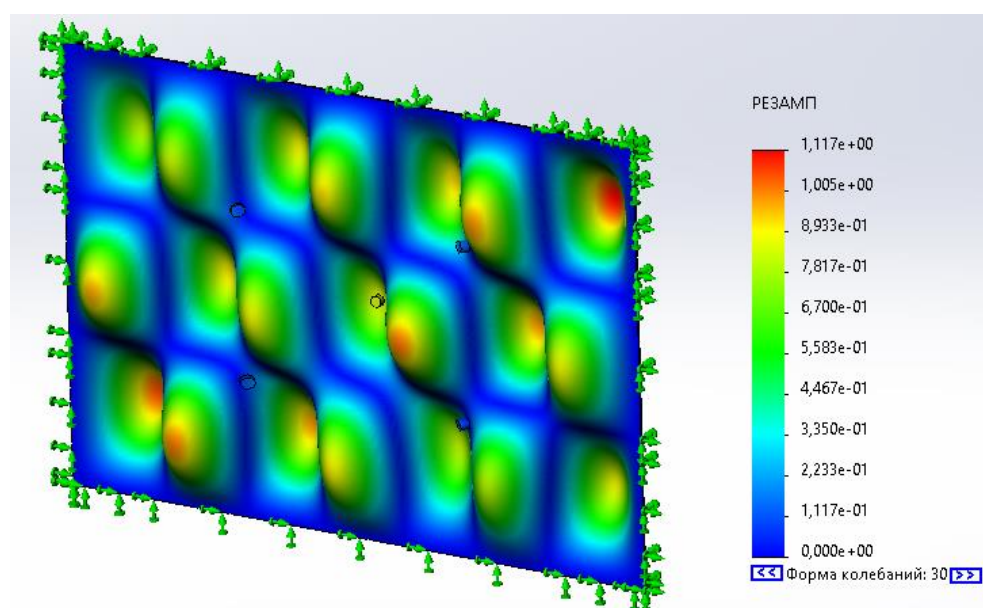


Рис. 13. 30-я форма колебаний (830,58 Гц)

Fig. 13. 30th vibration mode (830.58 Hz)

Экспериментальные исследования

Натурный эксперимент проводился на вибростенде V8-440 НВТ 900 CM8R по методу плавного изменения частоты синусоидальных колебаний ГОСТ 30630.1.1–99 «Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции». Для регистрации ускорений точек стержней применялись датчики 352C04, которые крепились на пластине в соответствии со схемой (рис. 14).

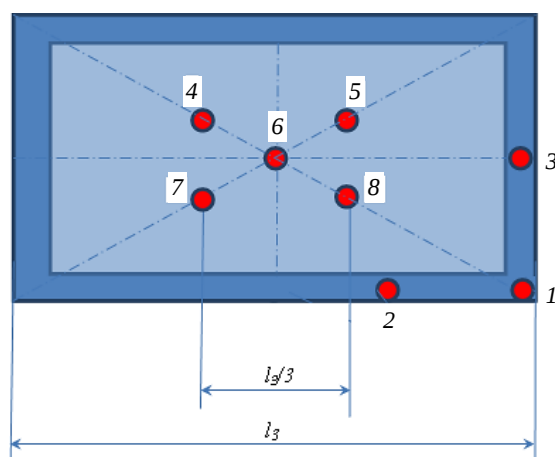


Рис. 14. Схема расположения датчиков

Fig. 14. Arrangement of sensors

Для крепления пластины к вибростенду использовалась специальная оснастка и рама из стержней прокатного профиля, к которой приваривалась пластина (рис. 15). Спектральные графики, полученные на вибростенде, приведены на рис. 16.



Рис. 15. Пластина с датчиками
Fig. 15. Plate with sensors

Значения частот, полученные в ПК «Лира», SolidWorks и в результате эксперимента, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения частот, полученные в ПК «Лира», SolidWorks
и в результате эксперимента**

Table 2

Frequencies calculated in Lira and SolidWorks software and in experiment

Значение собственной частоты колебаний пластины, Гц			Относительная погрешность, %	
полученные по методу конечных элементов в ПК «Лира»	полученные по методу конечных элементов в SolidWorks	полученные по экспериментальному методу	между расчетами в ПК «Лира» и экспериментальным методом	между расчетами в SolidWorks и экспериментальным методом
59,38	59,826	56	6,0	6,4
154,35	157,68	153	0,9	3,0
268,61	272,63	286	6,1	4,9
340,12	347,05	356	4,5	2,6
347,95	365,13	399	12,8	9,3
512,91	548,78	568	9,7	3,5
612,45	624,94	639	4,2	2,2
649,38	658,6	652	0,4	1,0
717,26	751,85	757	5,2	0,7
765,72	830,58	811	5,6	2,4

Окончание табл. 2

End of table

Значение собственной частоты колебаний пластины, Гц			Относительная погрешность, %	
полученные по методу конечных элементов в ПК «Ли́ра»	полученные по методу конечных элементов в SolidWorks	полученные по экспериментальному методу	между расчетами в ПК «Ли́ра» и экспериментальным методом	между расчетами в SolidWorks и экспериментальным методом
859,79	937,97	902	4,7	3,8
972,29	990,27	1005	3,3	1,5
1084,4	1197	1149	5,6	4,0
1107,5	1218,8	1202	7,9	1,4

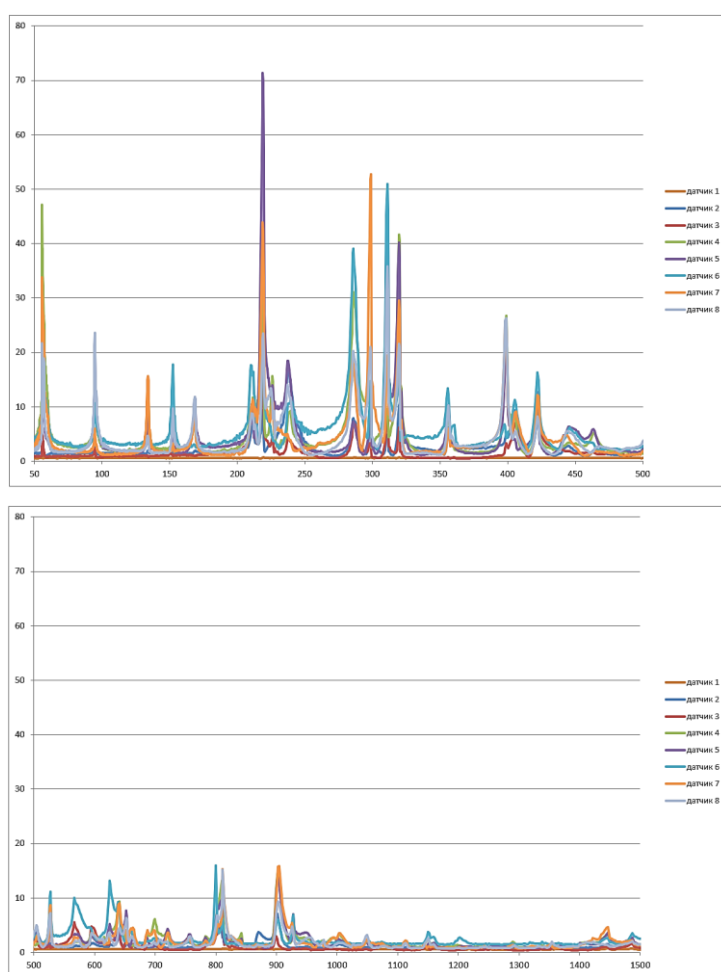


Рис. 16. Спектральные графики колебаний пластины, построенные по значениям амплитуд виброускорений

Fig. 16. Spectra of plate vibrations obtained by vibration acceleration amplitudes

Выводы

Сравнение результатов теоретического расчета собственных частот с результатами эксперимента показало небольшое расхождение – 4,9 % только для первой моды, для остальных это расхождение существенно больше. Средняя погрешность значений, полученных методом конечных элементов и экспериментальным методом, составила 3,3 % в случае применения SolidWorks и 5,5 % в случае применения ПК «Лира». В исследовании не принимались во внимание частоты с малым коэффициентом массового участия. Полученные на спектральных графиках значения частот, не учтенные в табл. 2, относятся к частотам собственных колебаний оснастки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liew K.M., Hung K.C., Lim M.K. Three-dimensional vibration of rectangular plates: Effects of thickness and edge constraints // *Journal of Sound and Vibration*. 1995. V. 182. P. 709–727.
2. Доннелл Л.Г. Балки, пластины и оболочки. Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 568 с.
3. Reddy J.N. Theory and analysis of elastic plates and shells. Boca Raton : CRC Press, 2006. 568 p.
4. Новожиллов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. Ленинград : Политехника, 1991. 656 с.
5. Муштари Х.М., Галимов К.З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань : Таткнигоиздат, 1957. 432 с.
6. Григолюк Э.И., Толкачев В.М. Контактные задачи теории пластин и оболочек. Москва : Машиностроение, 1980. 411 с.
7. Mustapha Hamdani, Mounia El Kadiri, Rhali Benamar. The effect of added point masses on the geometrically nonlinear vibrations of SCSC rectangular plates // *Diagnostyka*. 2022. V. 23 (2).
8. Shaojun Du, Andi Xu, Fengming Li, Seyed Mahmoud Hosseini. Vibration characteristics of irregular plates with a lumped mass: Theory and experiment // *Thin-Walled Structures*. 2022. V. 179.
9. Dheer Singh, Ankit Gupta. Influence of geometric imperfections on the free vibrational response of the functionally graded material sandwich plates with circular cut-outs // *Materials today: proceedings*. 2022. V. 62. Part. 3. P. 1496–1499.
10. Алгазин С.Д. Колебания пластины переменной толщины со свободными краями произвольной формы в плане // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52. № 1. С. 155–162.
11. Babahammou A., Benamar R. Free vibrations of rectangular plates simply supported at two opposite edges and elastically restrained at the two other edges. An analytical and a semi-analytical method // *Materials today: proceedings*. 2022. V. 59. P. 1. P. 899–903.
12. Tiantong Zhao, Yue Chen, Xianglong Ma, Shixun Linghu, Gang Zhang. Free transverse vibration analysis of general polygonal plate with elastically restrained inclined edges // *Journal of Sound and Vibration*. 2022. V. 536.
13. Еремьянц В.Э., Панова Л.Т., Асанова А.А. Анализ собственных частот и форм колебаний прямоугольной пластины, защемленной по двум противоположным краям // *Вестник КРСУ*. 2009. Т. 9. № 1. С. 64–70.

REFERENCES

1. Liew K.M., Hung K.C., Lim M.K. Three-dimensional vibration of rectangular plates: Effects of thickness and edge constraints. *Journal of Sound and Vibration*. 1995;182: 709–727.
2. Donnell L.H. Beams, plates and shells. Moscow: Nauka, 1982. 568 p. (Russian translation)
3. Reddy J.N. Theory and analysis of elastic plates and shells. Boca Raton: CRC Press, 2006. 568 p.
4. Novozhilov V.V., Chernykh K.F., Mikhailovskii E.I. Linear theory of thin shells. Leningrad: Politekhnik, 1991. 656 p. (In Russian)
5. Mushtari Kh.M., Galimov K.Z. Nonlinear theory of elastic shells. Kazan: Tatknigoizdat, 1957. 432 p. (In Russian)

6. Grigolyuk E.I., Tolkachev V.M. Contact problems in plate and shell theory. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980. 411 p. (In Russian)
7. Mustapha Hamdani, Mounia El Kadiri, Rhali Benamar. The effect of added point masses on the geometrically nonlinear vibrations of SCSC rectangular plates. *Diagnostyka*. 2022; 23 (2).
8. Shaohun Du, Andi Xu, Fengming Li, Seyed Mahmoud Hosseini. Vibration characteristics of irregular plates with a lumped mass: Theory and experiment. *Thin-Walled Structures*. 2022; 179.
9. Dheer Singh, Ankit Gupta. Influence of geometric imperfections on the free vibrational response of the functionally graded material sandwich plates with circular cut-outs. *Materials today: Proceedings*. 2022; 62 (Part. 3): 1496–1499.
10. Algazin S.D. Variable thickness plate vibrations with free edges of arbitrary shape. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2011; 52 (1): 155–162. (In Russian)
11. Babahammou A., Benamar R. Free vibrations of rectangular plates simply supported at two opposite edges and elastically restrained at the two other edges. An analytical and a semi-analytical method. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 59 (1): Pp. 899–903.
12. Tiantong Zhao, Yue Chen, Xianglong Ma, Shixun Linghu, Gang Zhang. Free transverse vibration analysis of general polygonal plate with elastically restrained inclined edges. *Journal of Sound and Vibration*. 2022; 536.
13. Erem'yants V.E., Panova L.T., Asanova A.A. Analysis of natural frequencies and vibrations of rectangular plate pinched at two opposite edges. *Vestnik KRSU*. 2009; 9 (1): 64–70. (In Russian)

Сведения об авторах

Морозов Николай Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13.

Гребенюк Григорий Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Максак Владислав Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Гаврилов Александр Александрович, канд. техн. наук, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, pialex@bk.ru

Authors Details

Nikolai A. Morozov, PhD, A/Professor, Orenburg State University, 13, Pobedy Ave., 460018, Orenburg, Russia.

Grigori I. Grebenyuk, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Vladislav I. Maksak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Aleksandr F. Gavrilov, PhD, Orenburg State University, 13, Pobedy Ave., 460018, Orenburg, Russia, pialex@bk.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.04.2023
Одобрена после рецензирования 24.04.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 08.04.2023
Approved after review 24.04.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 112–119.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 112–119.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.074.433

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119

EDN: JCAHAA

РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЕТЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ С УЧЕТОМ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ

Александр Ильич Сиянов, Данил Константинович Ярошевич

*Лысьвенский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, г. Лысьва, Россия*

Аннотация. При использовании цилиндрических сетчатых покрытий в особых условиях появляется необходимость учета колебательных процессов от работающих устройств и в случае механической поломки – прикрепленного оборудования, что определяет актуальность исследования.

Целью статьи является определение закономерностей влияния указанных процессов на работу покрытия и создание рациональной визуализации полученных результатов.

Рассмотрена методика приложения динамических воздействий на характерные зоны цилиндрических сетчатых покрытий. Принята рациональная форма сетки с диагональным элементом посередине. Учтены особенности построения конструкций и расположения статических нагрузок. Заданы определяющие математические зависимости и показан процесс моделирования динамической нагрузки.

Результаты. Осуществлено прямое интегрирование уравнений движения. Приведен конкретный числовой пример в рамках применения прикладного программного обеспечения. Получены приемлемые соотношения геометрических параметров.

Выводы. Зафиксированы экстремальные значения силовых факторов и параметров деформирования конструкции на заданном интервале времени.

Ключевые слова: цилиндрическое сетчатое покрытие, прямое интегрирование уравнений движения, динамическое воздействие, силовой фактор, параметр деформирования

Для цитирования: Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Расчет цилиндрических сетчатых покрытий с учетом уравнений движения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN: JCAHAA

ORIGINAL ARTICLE

CALCULATION OF CYLINDRICAL MESH COATINGS BASED ON EQUATIONS OF MOTION

Aleksandr I. Siyanov, Danil K. Yaroshevich

Lysva Affiliate of Perm National Research Polytechnic University, Lysva, Russia

Abstract. Purpose: Determination of oscillation process mechanisms affecting the coating operation and rational visualization of the results obtained.

© Сиянов А.И., Ярошевич Д.К., 2023

Methodology: The analysis of dynamic effects on cylindrical mesh coatings. The considered rational grid shape has a diagonal element in the middle. Numerical calculations are conducted using software.

Research findings: Structures under static loads are studied. Mathematical dependencies are identified and the model of the dynamic load is proposed. Direct integration of equations of motion is carried out. Acceptable ratios are obtained for geometric parameters.

Practical implication: Extreme values of force factors and parameters are recorded for the structure deformation at given time interval.

Originality/value: Oscillatory processes of operating devices and mechanical failure of the attached equipment considered in using cylindrical mesh coatings in specific conditions.

Keywords: cylindrical mesh coating, direct integration, equations of motion, dynamic load, force factor, deformation parameters

For citation: Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Calculation of cylindrical mesh coatings based on equations of motion. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN: JCAХАА

Введение

Общепринятая тенденция выполнять расчет цилиндрических сетчатых покрытий с использованием прикладных программных продуктов получила свое развитие еще в прошлом столетии. Разработанные тогда математические аппараты имели громоздкий вид [1, 2, 3] и не всегда позволяли получать точные результаты. Часто применялись приближенные методы и алгоритмы с принятыми предположениями и упрощениями [4]. Как правило, решались задачи устойчивости и исследовалась работа конструкций в условиях действия возможных статических и динамических нагрузок [1, 2, 3, 4, 5]. Созданные в то время формы сеток отличались архитектурной привлекательностью и, безусловно, радовали заказчика. Но с учетом минимизации затрат все они требовали тщательного изучения и проверки на живучесть. В условиях развития компьютерной техники появилась возможность с требуемой точностью рассчитывать покрытия для защиты от всех неблагоприятных нагрузок и воздействий. Тем более когда речь идет о динамике, где существуют опасные колебательные процессы. Их влияние зависит от параметров работающих устройств и механической поломки прикрепленного оборудования.

Постановка задачи

Сегодня разработки современных программных комплексов [6, 7, 8, 9] упростили задачи формообразования и открыли возможность для исследований расчетных схем цилиндрических сетчатых покрытий. Естественно, нет необходимости указывать целый ряд различных или похожих по форме многоэлементных сеток. Для наглядности достаточно привести характерный пример и показать особенности использования предложенных модулей. Поэтому в статье на основании созданной методологии изложена методика приложения динамических воздействий на конструкцию с учетом действия статических нагрузок. Все указанные процедуры выполнены средствами прикладного программного обеспечения.

Результаты

Путем анализа критериев формообразования и возможных размеров сетчатой поверхности выбрана цилиндрическая оболочка с ранее обоснованными геометрическими параметрами, характеристиками жесткости и граничными условиями [10].

Основу построения составили трубчатые продольные и поперечные ребра с нисходящими диагональными элементами (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент цилиндрического сетчатого покрытия с сечением стержней из горячекатаных бесшовных труб

Fig. 1. Fragment of cylindrical mesh coating with cross section of hot-rolled seamless pipes

Использованы рекомендации по конструированию и получены приемлемые значения длины L , ширины B , стрелы подъема f , радиуса кривизны R , размер $l \times h$ ячейки, число панелей n , граней m и класс стали для изготовления конструкции (таблица).

Параметры сетчатой поверхности оболочки

Parameters of mesh coating surface

L , м	B , м	f , м	R , м	l , м	h , м	n	m	Сталь
30	24	6,93	13,85	3,75	3,62	8	8	C245

Геометрическая неизменяемость системы обеспечена тем, что конструкция [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] оперта по контуру в каждом узле, причем закреплена шарнирно с полным запрещением перемещений в одной угловой точке и наложением связей по двум направлениям в остальных опорных узлах [18]:

$$Z = 0, \quad X = Y = Z = 0, \quad X = Z = 0. \quad (1)$$

Уравнение движения конечно-элементной модели покрытия представлено в виде [19]:

$$M\ddot{Z}(t) + C\dot{Z}(t) + KZ(t) = f(t). \quad (2)$$

Начальные условия заданы векторами Z_0 и $\dot{Z}_0$, свидетельствующими о начальных перемещениях и скоростях.

Интегрирование уравнений движения (2) произведено при начальных условиях:

$$Z(0) = Z_0, \quad \dot{Z}(0) = \dot{Z}_0. \quad (3)$$

Согласно функциональным требованиям динамическая нагрузка приложена к конструкции в виде работы механических устройств и сосредоточена на двух склонах покрытия в виде симметрично приложенных узловых сил на нижнем ребре граней, которые примыкают к граням коньковой зоны. Направление действия выбрано по оси Z.

Использован синусоидальный закон с амплитудой 3,6 кН, частотой 5 рад и сдвигом фаз 90° . Шаг интегрирования принят 0,01 с, время интегрирования 3 с, время начала и конца воздействия 0 и 1,26 с, количество дроблений шага 10 (рис. 2).

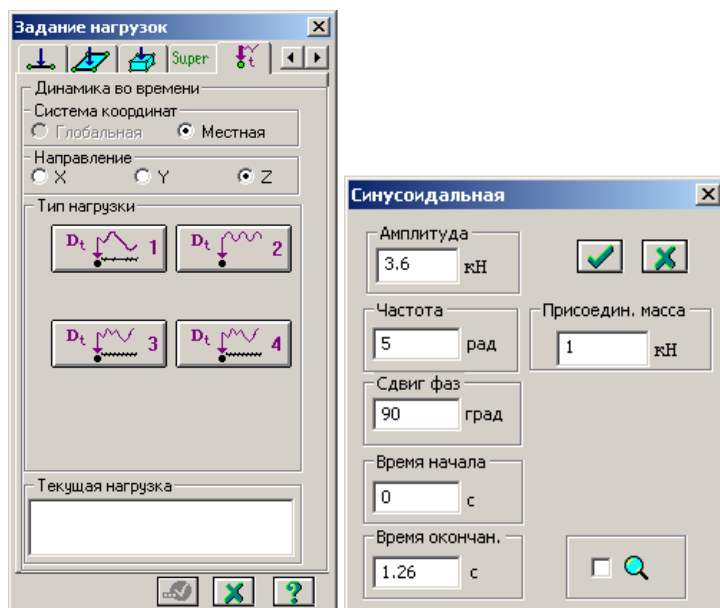


Рис. 2. Закладка «Динамика во времени» и тип нагрузки «Синусоидальная» с заданием необходимых параметров

Fig. 2. "Dynamics over time" tab and sinusoidal load with setting required parameters

Результат получен в виде графика (рис. 3) путем нажатия в нижнем квадрате диалогового окна «Синусоидальная» с получением знака ✓.

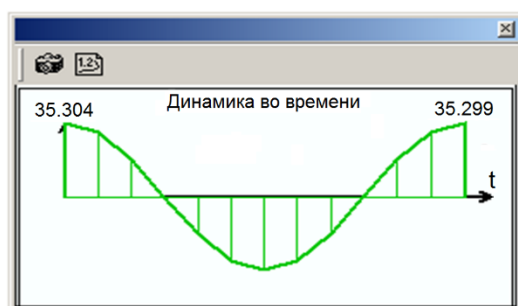


Рис. 3. Визуализация графика «Динамика во времени» по результатам расчета

Fig. 3. "Dynamics over time" visualisation according to calculations

Информация о внутренних силовых факторах и параметрах деформирования выведена нажатием на элементы и узлы. Показатели с учетом действия динамической нагрузки получили значительное увеличение. Максимальное усилие в элементе выросло на 18 %, причем экстремум (рис. 4) зафиксирован раньше половины заданного временного интервала на склоне с полным запрещением перемещений в угловом опорном узле.

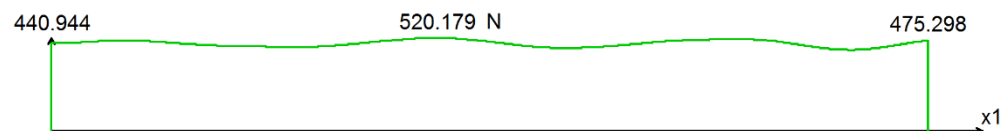


Рис. 4. График изменения максимального усилия в элементе, выявленного в середине опорного ребра

Fig. 4. Maximum force in the element in the middle of the support rib

Интересно отметить, что аналогичная закономерность получена и при изучении процесса деформирования покрытия. В частности, наибольшее перемещение узла определено практически на том же уровне во времени (рис. 5). Однако сравнение с величиной параметра статического расчета показало разницу 46 %.



Рис. 5. График изменения максимального перемещения узла, выявленного в середине нижнего ребра грани, примыкавшей к грани коньковой зоны

Fig. 5. Maximum node displacement in the middle of the lower rib of the edge adjacent to the ridge zone edge

По данным рис. 5 можно заключить, что изменение параметров с учетом действия статических и динамических нагрузок на конструкцию имеет наглядное представление на заданном интервале времени. Таким образом, установлена способность цилиндрического сетчатого покрытия воспринимать и выдерживать динамические нагрузки. Методология, представленная в настоящем исследовании, позволяет получить необходимую числовую и графическую информацию. На основе проведенных исследований появляется возможность выявить экстремальные значения и проследить за траекторией движения.

Выводы

1. Отражена методика приложения динамических воздействий на цилиндрические сетчатые покрытия. Учтены особенности построения конструк-

ций и расположения статических нагрузок. Приведен пример в рамках применения прикладного программного обеспечения.

2. Принята рациональная форма сетки и получены приемлемые соотношения геометрических параметров.

3. Указаны определяющие математические зависимости и показан процесс моделирования динамической нагрузки. Осуществлено прямое интегрирование уравнений движения.

4. Выявлены закономерности влияния колебательных процессов на работу покрытия и получена рациональная визуализация результатов.

5. Зафиксированы экстремальные значения силовых факторов и параметров деформирования конструкции на заданном интервале времени. Установлена способность цилиндрического сетчатого покрытия воспринимать и выдерживать динамические нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лебедев В.А., Лубо Л.Н. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1982. 136 с.
2. Лубо Л.Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек. Ленинград : ЛенЗНИИЭП, 1971. 63 с.
3. Райт Д.Т. Большие сетчатые оболочки. Ленинград : Стройиздат, 1966. 11 с.
4. Попов И.Г. Цилиндрические стержневые системы. Ленинград ; Москва : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. 112 с.
5. Пиеничнов Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. Москва : Наука, 1982. 352 с.
6. ЛИРА Софт. URL: <https://lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/>
7. SCAD Office. URL: <https://scadsoft.com/>
8. Ansys. URL: <https://www.ansys.com/>
9. Simcenter Femap with Nastran. 2022. URL: <https://www.cad-is.ru/femap>
10. Свердлов В.Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 1977. 174 с.
11. Siyanov A.I., Rynkovskaya M.I., Abu Mahadi M.I., Mathieu G.O. Improving the performance parameters of metal cylindrical grid shell structures // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. № 7S. P. 365–376.
12. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Collapse mechanism of single-layer cylindrical latticed shell under severe earthquake // Materials. 2020. V. 13 (11). P. 2519.
13. Siyanov A. Parameters and Ratios of Metal Cylindrical Mesh Shells // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 988. P. 052023.
14. Nie G., Zhang C., Zhi X., Dai J. Collapse of the single layered cylinder shell with model experimental study // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019. V. 19. P. 883–897.
15. Yan R., Chen Z., Wang X., Xiao X., Yang Y. Calculation Theory and Experimental Study of the K6 Single-layer Reticulated Shell // International Journal of Steel Structures. 2014. V. 14 (2). P. 195–212.
16. Siyanov A., Soshina T. Experimental Studies of the Cylindrical Mesh Shell Model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1079. P. 022076.
17. Gotsulyak E.A., Siyanov A.I. Stability and nonlinear deformation of cylindrical grids // International Applied Mechanics. 2004. V. 40 (4). P. 426–431.
18. Siyanov A. Modelling and Stability of Cylindrical Grid Shells // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 661. P. 012036.
19. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Физалко С.Ю., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. Москва : Изд-во АСВ, 2015. 848 с.

REFERENCES

1. Lebedev V.A., Lubo L.N. Mesh coatings in civil engineering in the North. Leningrad: Stroyizdat, 1982. 136 p. (In Russian)
2. Lubo L.N. Mesh coating design and calculation guide. Leningrad: LenZNIIEHP, 1971. 63 p. (In Russian)
3. Rayt D.T. Large mesh shells. Leningrad: Stroyizdat, 1966. 11 p. (In Russian)
4. Popov I.G. Cylindrical rod systems. Leningrad, Moscow, 1952. 112 p. (In Russian)
5. Pshenichnov G.I. Theory of thin elastic mesh shells and plates. Moscow: Nauka, 1982. 352 p. (In Russian)
6. LIRA soft. Available: <https://lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/> (accessed November 16, 2022)
7. SCAD office. Available: <https://scadsoft.com/> (accessed November 16, 2022)
8. Ansys. Available: www.ansys.com/ (accessed November 16, 2022)
9. Simcenter Femap with Nastran 2022. Available: www.cad-is.ru/femap (accessed November 16, 2022)
10. Sverdlov V.D. Investigation of spatial cylindrical rod systems of coatings. PhD Thesis. Kiev, 1977. 174 p. (In Russian)
11. Siyanov A.I., Rynkovskaya M.I., Abu Mahadi M.I., Mathieu G.O. Improving the performance parameters of metal cylindrical grid shell structures. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017; (7S): 365–376.
12. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Collapse mechanism of single-layer cylindrical latticed shell under severe earthquake. *Materials*. 2020; 13 (11): 2519.
13. Siyanov A. Parameters and ratios of metal cylindrical mesh shells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 988: 052023.
14. Nie G., Zhang C., Zhi X., Dai J. Collapse of the single layered cylinder shell with model experimental study. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019; 19: 883–897.
15. Yan R., Chen Z., Wang X., Xiao X., Yang Y. Calculation theory and experimental study of the K6 single-layer reticulated shell. *International Journal of Steel Structures*. 2014; 14 (2): 195–212.
16. Siyanov A., Soshina T. Experimental studies of the cylindrical mesh shell model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079: 022076.
17. Gotsulyak E.A., Siyanov A.I. Stability and nonlinear deformation of cylindrical grids. *International Applied Mechanics*. 2004; 40 (4): 426–431.
18. Siyanov A. Modelling and stability of cylindrical grid shells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 66: 012036.
19. Karpilovskiy V.S., Kriksunov Eh.Z., Malyarenko A.A., Fialko S.Yu., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. SCAD Office. Version 21. SCAD++ computing system. Moscow: ASV, 2015. 848 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Сиянов Александр Ильич, канд. техн. наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 618900, г. Лысьва, ул. Ленина, 2, vntusiyarov@gmail.com

Ярошевич Данил Константинович, студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 618900, г. Лысьва, ул. Ленина, 2, yaroshe-wach@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr I. Siyanov, PhD, A/Professor, Lysva Affiliate of Perm National Research Polytechnic University, 2, Lenin Str., 618900, Lysva, Russia, vntusiyarov@gmail.com

Danil K. Yaroshevich, Student, Lysva Affiliate of Perm National Research Polytechnic University, 2, Lenin Str., 618900, Lysva, Russia, yaroshe-wach@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 16.11.2022
Одобрена после рецензирования 22.03.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 16.11.2022
Approved after review 22.03.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 120–127.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 120–127.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-120-127

EDN: XURGUZ

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ

Иван Иванович Подшивалов

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

Аннотация. Объектом исследования являются железобетонные стропильные фермы одноэтажного многопролетного промышленного здания, выполненного из сборных железобетонных конструкций.

Цель работы состоит в расчетном обосновании способа усиления железобетонных стропильных ферм с учетом обнаруженного коррозионного повреждения арматуры и наличия продольных трещин в защитном слое бетона шириной раскрытия в несколько миллиметров.

Расчетное обоснование способа усиления железобетонных стропильных ферм выполнено моделированием их напряженно-деформированного состояния в ПК MicroFe с созданием расчетной модели в пространственной системе с учетом выявленных повреждений железобетонных конструкций и разработанного технического решения по усилению стропильных ферм.

Расчетным путем обосновано усиление нижнего пояса железобетонных стропильных ферм полимерным волокном с использованием двух расчетных схем – из сталежелезобетонного элемента и из элемента в виде слоистого материала с последующим сравнением полученных результатов.

Ключевые слова: железобетонный каркас, стропильные фермы, усиление, углепластиковое волокно, расчетная модель, расчетная схема

Для цитирования: Подшивалов И.И. Расчетное обоснование способа усиления железобетонных стропильных ферм промышленного здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 120–127. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-120-127. EDN: XURGUZ

ORIGINAL ARTICLE

REINFORCEMENT ANALYSIS OF CONCRETE ROOF FRAMES OF INDUSTRIAL BUILDING

Ivan I. Podshivalov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: Reinforcement analysis of concrete roof frames of one-storey industrial frame building with respect to the detected corrosion of reinforcement and longitudinal cracks with the opening width of several millimeters in the concrete protective layer.

Methodology: The analysis is performed by using the finite element modeling in the MicroFe software, the developed model of detected damages of the concrete structures, and design solution of the roof frame strengthening.

Research findings: Rationale is given to the lower roof frame strengthening with polymer fiber using two analytical models, namely steel reinforced element and layer material element. The obtained results are then compared.

Keywords: reinforced concrete frame, roof frame, reinforcement, carbon fiber, design model, analytical model

For citation: Podshivalov I.I. Reinforcement analysis of concrete roof frames of industrial building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 120–127. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-120-127. EDN: XURGUZ

Сборные железобетонные конструкции в каркасных зданиях позволяют эффективно использовать их несущую способность [1]. При реконструкции каркасных зданий актуальной задачей является определение прочностных и жесткостных параметров железобетонных конструкций [2]. Дефекты и повреждения в конструктивных элементах при длительной эксплуатации здания снижают их жесткость и прочность [3, 4]. Продлению срока эксплуатации здания способствует своевременность восстановления поврежденных конструктивных элементов [5].

Коррозионное повреждение бетона и арматуры вызывает разрушение железобетонных конструкций [6]. Одним из основных способов их восстановления является поверхностная защита. В последнее время на смену традиционному подходу к ремонту корродированных железобетонных элементов с применением стальных элементов приходит использование полимерных материалов на основе высокопрочного волокна [7], что вызывает необходимость в определении прочностных и деформационных свойств композитных материалов при различных видах нагружения усиливаемых конструкций. Относительно недавно получено напряженно-деформированное состояние углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений [8]. Эффективность работы систем внешнего армирования на основе углеродных волокон во многом зависит от адгезии к усиливаемой конструкции [9]. Перед использованием композитных материалов, как правило, выполняют капитальный ремонт поврежденных железобетонных конструкций [10].

Расчет растянутых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов, усиленных по контуру композитными материалами, можно выполнить по СП 164.1325800.2014¹ с принятием допущения о том, что сдвиговая жесткость адгезива обеспечивает совместную работу бетона и композитного материала.

В настоящее время моделирование взаимодействия железобетонных конструкций здания в пространственной постановке является достаточно актуальным [11]¹.

Конструктивное решение рассматриваемого одноэтажного промышленного каркасного здания, эксплуатирующегося с начала 1960-х гг., приведено

¹ СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.

в работе [12]. По результатам обследования, максимальное коррозионное поражение арматуры в элементах стропильных ферм составило 20 % от поперечного сечения проволоочной арматуры канатов К-7 в нижнем поясе.

По материалам обследования двух крайних пролетов каркасного здания на основе конструктивной схемы здания в ПВК MicroFe разработана расчетная модель, в которой элементы каркаса моделируются конечным элементом типа «стержень», а плиты покрытия – конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки» (рис. 1). Закрепление колонн в свайном фундаменте принято жестким.

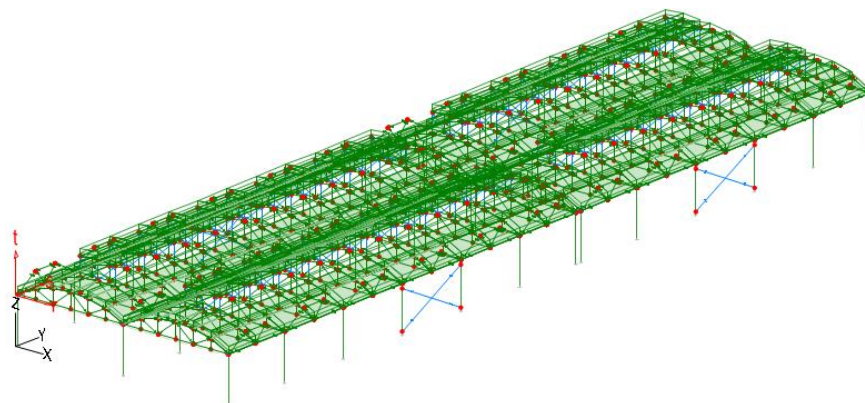


Рис. 1. Расчетная модель

Fig. 1. Design model

В расчетной модели рассмотрены три расчетные схемы.

Расчетная схема № 1 – стадия эксплуатации здания с 20%-м коррозионным износом арматуры в нижнем поясе ферм. При этом учтено, что капитальный ремонт коррозионно-поврежденных элементов выполнен и совместная работа арматуры с восстановленным защитным слоем бетона обеспечена. В нижнем поясе стропильных ферм установлена проволоочная арматура в виде канатов 7Ø15К-7. Класс бетона В30.

Расчетная схема № 2 – стадия эксплуатации здания после проведения усиления нижнего пояса ферм полимерным волокном. Волокно состоит из углепластика (ламината) с расчетной прочностью $R_f = 3100$ МПа, модулем упругости $E_f = 1,7 \cdot 10^5$ МПа, предельной деформацией растяжения $\varepsilon_f = 0,017$ (1,7 %), толщиной слоя $t_f = 1,4$ мм, плотностью $\rho = 1,35$ т/м³. В расчетной схеме углепластиковое волокно заменено на эквивалентный круглый стальной стержень, установленный в центре поперечного сечения нижнего пояса ферм (сталежелезобетонный элемент) с площадью поперечного сечения $A_{s, экв. СФ} = E_f A_f / E_s = 1,7 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 0,3 \cdot 0,0014 / 1,8 \cdot 10^5 = 15,9 \cdot 10^{-4}$ м² = 15,9 см², где 0,3 м – сторона поперечного сечения нижнего пояса стропильных ферм. Отсюда диаметр эквивалентного стального стержня составил 45 мм.

Расчетная схема № 3 – стадия эксплуатации здания после проведения усиления полимерным волокном нижнего пояса ферм, который рассматривается как элемент, состоящий из слоистого материала, где кроме бетона и ка-

натной арматуры работают полимерное волокно и состав для наклейки композитного материала в виде эпоксидной смолы со следующими физико-механическими характеристиками: расчетной прочностью на сжатие и растяжение $R_{\text{эп.с}} = 150$ МПа и $R_{\text{эп.р}} = 65$ МПа соответственно, модулем упругости $E_{\text{эп}} = 3500$ МПа, предельной деформацией растяжения $\varepsilon_{\text{эп}} = 0,05$ (5 %), толщиной слоя $t_{\text{эп}} = 1$ мм, плотностью $\rho = 1,2$ т/м³. Материал слоев нижнего пояса стропильных ферм работает нелинейно по соответствующим диаграммам деформирования. Расчетная схема поперечного сечения нижнего пояса ферм в виде слоистого материала приведена на рис. 2.

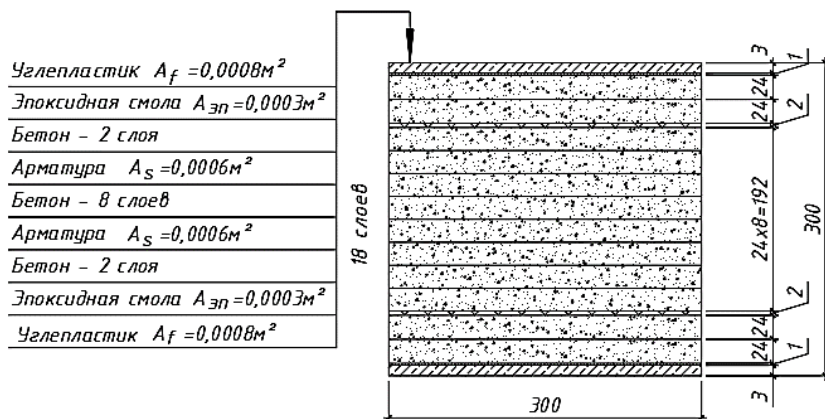


Рис. 2. Расчетная схема поперечного сечения нижнего пояса ферм в виде слоистого материала в расчетной схеме № 3

Fig. 2. Design model of cross-section of back bar in the form of laminated material in design model 3

Изополя продольных сил и вертикальных перемещений в рядовой стропильной ферме, полученные в расчетной схеме № 1, приведены на рис. 3, 4.

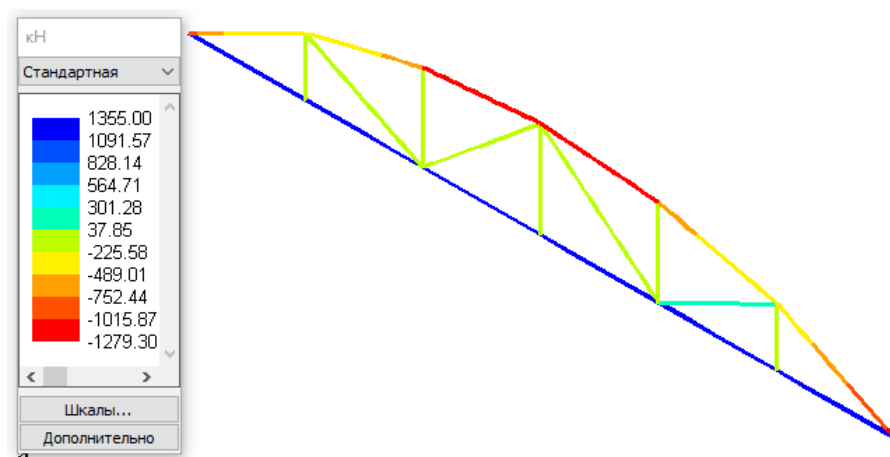


Рис. 3. Изополя продольных сил в рядовой стропильной ферме в расчетной схеме № 1

Fig. 3. Isofields of longitudinal forces of ordinary close couple in design model 1

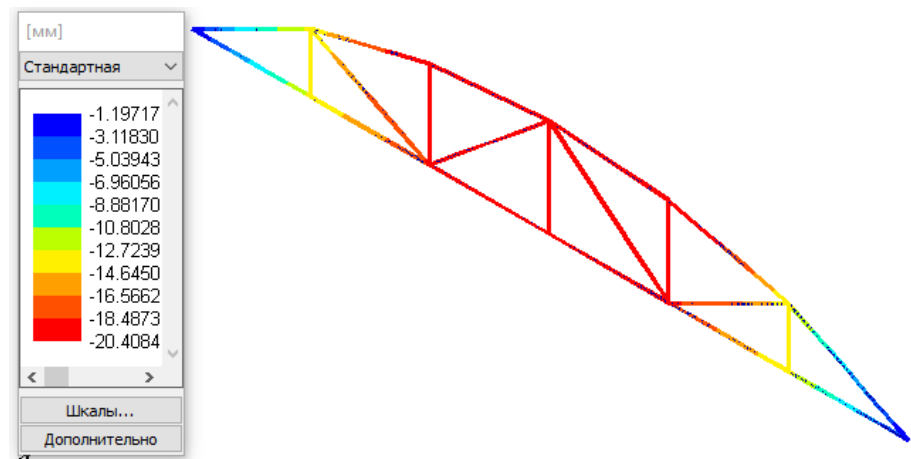


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений в рядовой стропильной ферме в расчетной схеме № 1
 Fig. 4. Isofields of vertical displacements of ordinary close couple in design model 1

Эпюры необходимого расчетного продольного армирования в нижнем поясе стропильных ферм по трем расчетным схемам представлены на рис. 5.

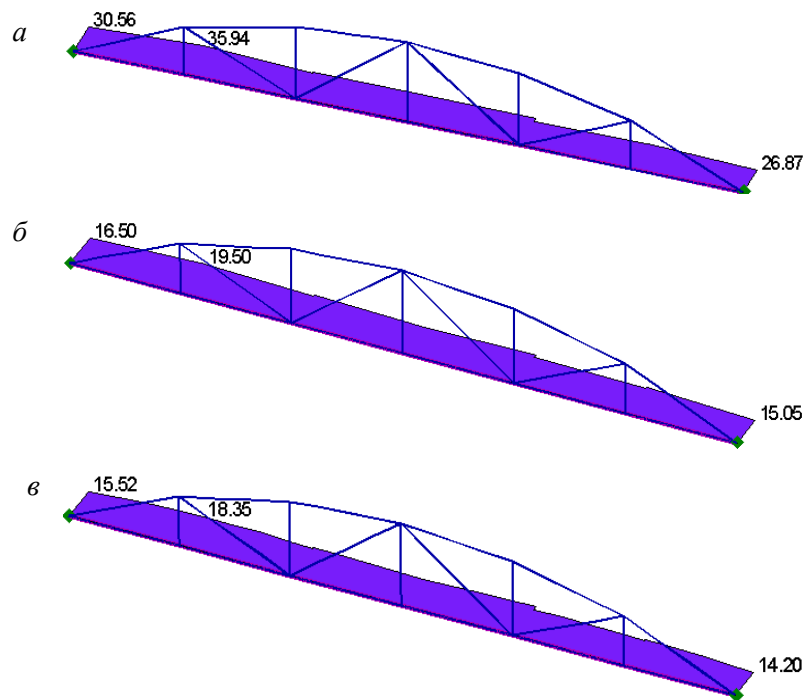


Рис. 5. Эпюры необходимого расчетного продольного армирования (cm^2) в нижнем поясе рядовой стропильной фермы:

a – расчетная схема № 1; *б* – расчетная схема № 2; *в* – расчетная схема № 3

Fig. 5. Diagrams of the required design longitudinal reinforcement (cm^2) in back bar of ordinary close couple:

a – design model 1; *b* – design model 2; *c* – design model 3

Сводные значения фактической (с учетом установленного коррозионного износа) и необходимой расчетной продольной арматуры в нижнем поясе стропильных ферм приведены в таблице.

Значения фактической и необходимой расчетной продольной арматуры в нижнем поясе стропильных ферм (см²)

Actual and required design longitudinal reinforcement (cm²) in back bar of ordinary close couple

Тип элемента фермы	Расчетная схема № 1		Расчетная схема № 2		Расчетная схема № 3	
	фактическая	расчетная	фактическая	расчетная	фактическая	расчетная
Нижний пояс	25,92	35,94	25,92	19,50	25,92	18,35

Как видно из данных таблицы, в расчетной схеме № 1 после выполнения капитального ремонта коррозионно-поврежденных элементов и обеспечения совместной работы арматуры с восстановленным защитным слоем бетона фактического армирования в нижнем поясе стропильных ферм недостаточно для обеспечения их несущей способности, и требуется их усиление.

Использование двух расчетных схем при обосновании усиления нижнего пояса железобетонных стропильных ферм в виде сталежелезобетонного элемента и элемента, представленного слоистым материалом, дает приемлемые для практического использования результаты.

Таким образом, расчетным путем обосновано усиление нижнего пояса железобетонных стропильных ферм полимерным волокном с использованием двух расчетных схем – из сталежелезобетонного элемента и из элемента в виде слоистого материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коянкин А.А., Митасов В.М. Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестник МГСУ. 2015. № 9. С. 28–35.
2. Ерышев В.А., Латышева Е.В., Малыш А.С. Определение эксплуатационных параметров качества железобетонных конструкций в составе здания без их физического разрушения путем натурных испытаний // Известия КГАСУ. 2015. № 1 (13). С. 75–79.
3. Золина Т.В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108.
4. Ступишин Л.Ю. Оценка состояния несущих конструкций зданий и сооружений: ресурс несущей способности зданий с дефектами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 39–44.
5. Золина Т.В., Туснин А.Р. Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49.
6. Степанова В.Ф. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии – основа обеспечения долговечности зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 13–16.

7. Данилов А.И., Калугин И.А. Усиление растянутых элементов полимерами на основе высокопрочного волокна // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 25–31.
8. Устинов А.М., Клопотов А.А., Потекаев А.И., Абзаев Ю.А., Плевков В.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений // Известия Алтайского государственного университета. 2018. № 1 (99). С. 58–63. DOI 10.14258/izvasu(2018)1-10
9. Симаков О.А., Зенин С.А., Кудинов О.В., Осипов П.В. Расчет анкеров из углеродных волокон на вырыв и срез для систем внешнего армирования // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 4–8.
10. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 38–42.
11. Золина Т.В., Садчиков П.Н. Моделирование работы конструкций промышленного здания с учетом изменения жесткости в процессе эксплуатации // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 69–76.
12. Подшивалов И.И., Пляскин А.С., Тарасов А.А. Особенности усиления железобетонных стропильных и подстропильных ферм, получивших эксплуатационные повреждения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 147–160.

REFERENCES

1. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Prefabricated solid building frame and its properties in different life cycles. *Vestnik MGSU*. 2015; (9): 28–35. (In Russian)
2. Eryshev V.A., Latysheva E.V., Malysh A.S. In situ testing of performance parameters of reinforced concrete structures without physical fracture. *Izvestiya KGASU*. 2015; 1 (13): 75–79. (In Russian)
3. Zolina T.V. Examination procedure for building residual operation life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. (In Russian)
4. Stupishin L.Yu. Load-bearing capacity of buildings with defects. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017; (10): 39–44. (In Russian)
5. Zolina T.V., Tusnin A.R. Extending of operation life of industrial building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. (In Russian)
6. Stepanova V.F. Corrosion protection of concrete and reinforced concrete structures as a basis for building durability. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; (1): 13–16. (In Russian)
7. Danilov A.I., Kalugin I.A. Tensile member reinforcement with high-strength fiber polymers. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (12): 25–31. (In Russian)
8. Ustinov A.M., Klopotov A.A., Potekaev A.I., Abzaev Yu.A., Plevkov V.S. Digital image correlation of stress-strain state of CFRP surface layers under axial tension. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018; 1 (99): 58–63. DOI 10.14258/izvasu(2018)1-10 (In Russian)
9. Simakov O.A., Zenin S.A., Kudinov O.V., Osipov P.V. Strength analysis of carbon fiber anchor for external reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; (4): 4–8. (In Russian)
10. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elements of the theory of development of concrete structures with non-metallic composite reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (5): 38–42. (In Russian)
11. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Modelling the industrial building performance with respect to stiffness during operation. *Vestnik MGSU*. 2012; (10): 69–76. (In Russian)
12. Podshivalov I.I., Plyaskin A.S., Tarasov A.A. Reinforcement of concrete principal and secondary trusses after service damages. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (2): 147–160. (In Russian)

Сведения об авторе

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, 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 21.04.2023
Одобрена после рецензирования 05.05.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 21.04.2023
Approved after review 05.05.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 128–142.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 128–142.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.072.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-128-142

EDN: YHUYZS

ЖЕСТКОСТЬ ЧАСТИЧНО ОБЕТОНИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ БАЛОК И СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Денис Владимирович Конин

*Центральный научно-исследовательский институт
строительных конструкций имени В.А. Кучеренко
АО «НИЦ “Строительство”», г. Москва, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Использование сталежелезобетонных конструкций перекрытий со стальными частично обетонированными балками и сборными элементами настилов – это эффективное решение с точки зрения снижения расхода материалов и повышения жесткости конструкций. Изучение жесткости подобных конструкций, принимаемых в расчетах как отдельных элементов, так и зданий в целом, является актуальной задачей.

В процессе работы изучены и проанализированы результаты экспериментальных исследований жесткости частично омоноличенных сталежелезобетонных балок и балок в составе полноразмерных перекрытий.

Цель исследований: выявление действительных значений изгибной жесткости конструкций.

Основные результаты. Анализ экспериментальных исследований показывает, что график жесткости простых сталежелезобетонных балок любой формы можно разбить на 3 этапа: первоначальное падение жесткости, этап нормальной работы, этап перехода в предельное состояние с последующим разрушением. Для каждого вида исследованных балок установлены соответствующие границы этапов работы. Расчетное значение величины жесткости комбинированного поперечного сечения частично обетонированной балки при наличии стержневой арматуры определяется по известным формулам в нормативных документах. Жесткость элементов без стержневой арматуры следует определять с понижающим коэффициентом. Испытания полноразмерных перекрытий с частично обетонированными балками и сборными перекрытиями подтверждают возможность использования нормативных формул расчета жесткости, однако следует принимать в расчет ширину сжатой полки в 3 раза меньше, чем для монолитной плиты.

Выводы. Разрушение комбинированной изгибаемой сталежелезобетонной конструкции, сопровождающееся развитием пластических деформаций в полках двутавра, разрушением сжатого бетона и контактной зоны «сталь – бетон», не приводит к «обнулению» ее жесткости. Остаточная жесткость при достижении ею предельного состояния по прочности составляет не менее 60–70 % от ее нормативного значения. Этот запас жесткости может быть использован при расчетах зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение.

Ключевые слова: бетон, сталь, сталежелезобетонная конструкция, стержневая арматура, сборный элемент, жесткость, прогиб, изгиб

Финансирование: экспериментальная часть работы выполнена при поддержке Ассоциации «Объединение участников бизнеса по развитию стального строительства».

Благодарности: автор выражает благодарность докт. техн. наук И.И. Ведякову, докт. техн. наук С.С. Каприелову, И.А. Чилину, канд. техн. наук А.В. Бучкину за помощь в организации и проведении эксперимента; канд. техн. наук А.С. Крылову, И.В. Ртищевой за помощь в обработке данных эксперимента.

Для цитирования: Конин Д.В. Жесткость частично обетонированных стальных балок и сталежелезобетонных перекрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 128–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-128-142. EDN: YHUYZS

ORIGINAL ARTICLE

RIGIDITY OF PARTIALLY CONCRETED STEEL BEAMS AND STEEL-REINFORCED FLOORS

Denis V. Konin

Koucherenko Central Research Institute of Civil Structures, Moscow, Russia

Abstract. The use of steel-reinforced (composite) floor structures with partially concreted steel beams and prefabricated flooring elements is an effective solution in terms of reducing the material consumption and increasing the structural rigidity. The experimental results of partially concreted composite beams and beams as part of full-size ceilings are studied and analyzed herein. It is shown that the stiffness graph of simple steel-reinforced concrete beams of any shape can be divided into 3 stages: an initial stiffness drop, normal operation, and transition to the limit state with subsequent destruction. The boundaries of these stages are identified for each beam type. The stiffness of the combined cross-section of the partially concreted beam with the rod reinforcement is calculated using well-known formulas from regulatory documents. The element rigidity without rod reinforcement is determined with the decreasing coefficient. Tests of full-size ceilings with partially concreted beams and prefabricated floors confirm the possibility of using standard formulas for the stiffness calculation. However, the width of the compressed concrete flange should be taken into account by less than 3 times than for monolithic slab. The destruction of bending composite structure is accompanied by plastic deformation in flanges of I-beam, destruction of compressed concrete and steel-concrete interaction. However, it does not lead to zeroing of its rigidity. When residual stiffness reaches the ultimate strength state, it is at least 60–70 % of its normative value. This rigidity can be used for the progressive collapse analysis of buildings.

Keywords: concrete, steel, composite steel, reinforcement, precast structure, rigidity, deflection, bending

Funding: Experimental research was financially supported by the Steel Building Development Association.

Acknowledgements: The author expresses gratitude I.I. Vedyakov, DSc, S.S. Kapriellov, DSc, I.A. Chilin, DSc, and A.V. Buchkin, PhD for their assistance in organizing and conducting the experiment. The author likes to thank A.S. Krylov, PhD and I.V. Rtscheva, PhD for their help with the experimental data processing.

For citation: Konin D.V. Rigidity of partially concreted steel beams and steel-reinforced floors. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo

Введение

Эффективность конструкций, в которых стальные и железобетонные изгибаемые элементы включаются в совместную работу, обсуждается во многих отечественных и иностранных источниках [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Частично обетонированные сталежелезобетонные конструкции имеют некоторые особенности работы [4, 7, 8], однако в то же время являются недостаточно изученными с экспериментальной точки зрения. Они обладают рядом свойств, которые необходимо учитывать при конструировании и расчетах [7, 8, 9, 10, 11, 12]. В частности, к таким конструкциям неприменимы конструктивные требования по величинам защитных слоев, правила анкеровки арматуры, минимальные требования к армированию изгибаемых элементов и другие требования СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции» и СП 266.1325800 «Сталежелезобетонные конструкции. Правила проектирования». Наличие включенных в работу сборных элементов перекрытий (настилов) увеличивает жесткость конструкции, однако конструкции объединения при этом могут быть чрезвычайно сложными: соединения плит с балками на болтах с предварительным натяжением [2], приварка закладных деталей к балке [1], устройство специальных упоров на балках в швах плит [5], бетонирование пустот перекрытий с пропуском в них арматуры, устройство стад-болтов на стенках и полках балок [4, 6, 7, 8, 12, 13].

Целью настоящей работы являлось выявление действительных значений изгибной жесткости для частично обетонированных сталежелезобетонных конструкций, а также для конструкций, которые включают в работу сборные элементы перекрытий. Задачи исследования: верификация существующих нормативных методик расчета приведенной жесткости с экспериментальными данными; установление эффективности простого способа объединения стальной балки и сборных железобетонных элементов в виде упора на опоре стальной балки.

Методы

Для выявления значений жесткости сталежелезобетонных частично обетонированных балок создано 4 вида моделей (рис. 1). Балки изготовлены путем частичного обетонирования бетоном класса прочности на сжатие В30 стального профиля 20Ш1 по ГОСТ Р 57837–2017 из стали С255. Модели М2.2, М2.3 и М2.4 армируются продольной стержневой арматурой диаметром 8, 10, 16 и 20 мм, а также поперечной арматурой диаметром 10 мм класса А500С. На стенке стального двутавра в моделях М2.3 предусмотрена установка гибких упоров из арматурной стали диаметром 10 мм класса А500С (длина – 50 мм, шаг – 250 мм по высоте). Полка тавровой балки М2.4 армируется сеткой из арматуры d8 класса А500С с шагом 150×150 мм. Ширина полки бетона тавровой балки – 700 мм, толщина полки – 76 мм, защитный слой между поверхностью бетона и верхней полкой стальной балки – 36 мм. Поверхность стальных балок не подвергалась очистке от окалины и ржавчины, были уда-

лены только грубые загрязнения в виде масла, пыли и грязи, окалины. Всего было изготовлено 12 балок (по 3 шт. каждого вида).

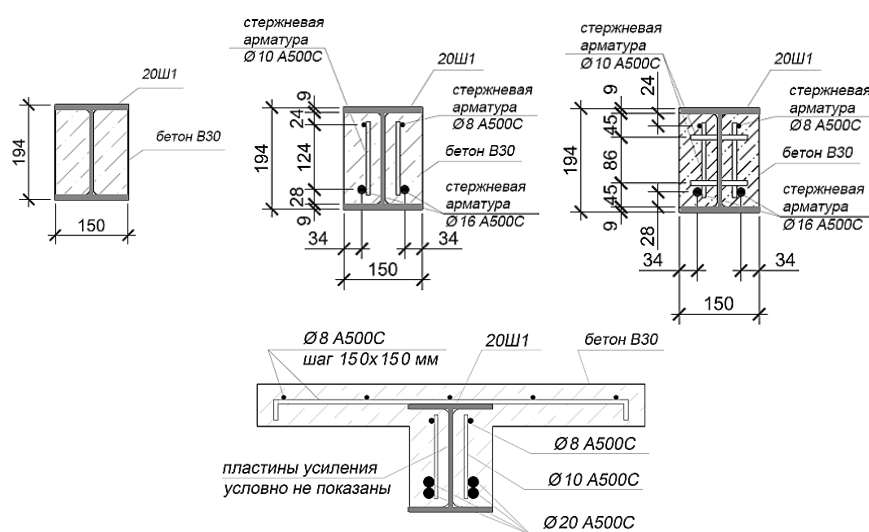


Рис. 1. Поперечное сечение балок M2.1, M2.2, M2.3, M2.4

Fig. 1. Cross section of beams M2.1, M2.2, M2.3, M2.4

Для проверки гипотез по величинам жесткости частично обетонированных стальных балок и для выявления закономерностей их работы с элементами из сборного железобетона проведены испытания полноразмерных моделей перекрытий с двумя видами опирания (рис. 2, а, б) – на нижний пояс стальной балки (МЗ.1) и на среднюю специальную полку так, чтобы верх плит совпадал с верхом балки (МЗ.2). Модели представляют собой трехбалочные конструкции, которые имели 6 неподвижных опор в виде стальных жесткозакрепленных в основании стоек, 3 балки пролетом 6 м и сборное перекрытие из преднапряженных многпустотных плит длиной 5 м и толщиной 160 мм. Включение в совместную работу стальных балок и плит осуществлялось за счет сил трения, установки прижимных уголков в приопорных зонах балок, препятствующих смещению плит при изгибе, заполнением полостей между стенкой стальной балки и торцами перекрытий (рис. 2, в), частичным омоноличиванием пустот в плитах на глубину 100–150 мм. Зазор между боковой гранью плиты и упором из уголка 100×10 мм в приопорной зоне балки заполнялся бетоном, что предотвращало сдвиг сборных плит при работе балки на изгиб и обеспечивало передачу сил сдвига (S) на стальную балку.

Для МЗ.1 был использован несимметричный сварной двутавр высотой 214 мм (рис. 2, а) из стали С255, для МЗ.2 – прокатный профиль 30Б1 по ГОСТ Р 57837–2017 (рис. 2, б). Швы между плитами, между стальными балками и плитами, пустоты заполнены самоуплотняющейся бетонной смесью на мелком заполнителе фракции 5–10-го класса по прочности на сжатие В40. Совместная работа плит перекрытий между собой обеспечена посредством устройства продольных монолитных шпонок из того же бетона. Для получе-

ния достоверных результатов, а также исключения случайных ошибок изготовления моделей было испытано по 2 идентичных модели перекрытий каждого вида (всего испытано 4 модели перекрытия).

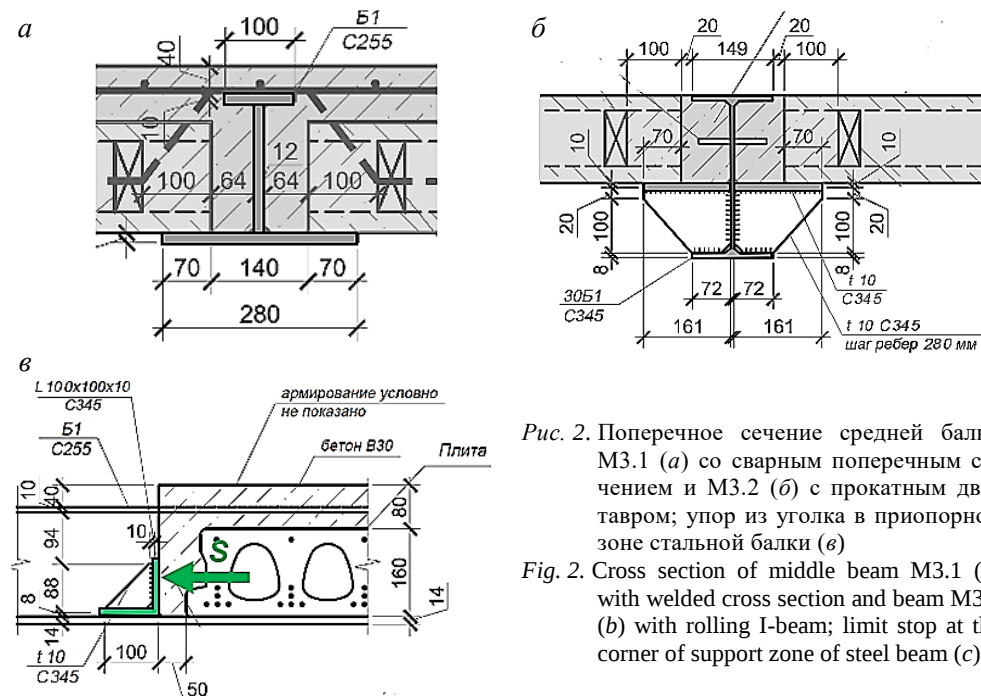


Рис. 2. Поперечное сечение средней балки М3.1 (а) со сварным поперечным сечением и М3.2 (б) с прокатным двутавром; упор из уголка в приопорной зоне стальной балки (в)

Fig. 2. Cross section of middle beam M3.1 (a) with welded cross section and beam M3.2 (b) with rolling I-beam; limit stop at the corner of support zone of steel beam (c)

Нагружение производилось поэтапно ступенями не более 10 % от контрольной нагрузки по прочности, на каждой ступени осуществлялась выдержка модели. Испытания моделей М2 выполнены на чистый изгиб на гидравлическом тарированном прессе ПММ-1000. Испытания полноразмерных фрагментов перекрытий группы М3 выполнены на силовом полу. Нагрузка прикладывалась равномерно по всей площади конструкции посредством размещения штучных калиброванных грузов.

Результаты

А. Жесткость сталежелезобетонных конструкций

В процессе испытаний фиксировался прогиб конструкций. Зная прогиб и приложенный к балке перекрытия момент, можно вычислить жесткость сталежелезобетонного элемента D на каждом этапе нагружений:

$$D = \Sigma EI = \frac{5}{48} \frac{l^2}{f} M, \quad (1)$$

где l и f – пролет и прогиб в середине конструкции; M – момент в поперечном сечении. Жесткость D будет отражать жесткость комбинированного сталежелезобетонного элемента с учетом работы бетона, степени сцепления железобетона и стали, развития и образования трещин в бетоне.

Согласно формуле Г.11 СП 266.1325800.2016, приведенная жесткость поперечного сечения вычисляется путем суммирования жесткостей составных частей элементов:

$$D = k_b E_{b1} I + k_s (E_s I_s + E_{st} I_{st}), \quad (2)$$

где E_s, E_{st} – модули упругости бетона, гибкой и жесткой арматуры соответственно; E_{b1} – модуль деформации сжатого бетона, принимаемый равным при непродолжительном действии нагрузки, $E_{b1} = 0,85E_b$. Коэффициенты k_b и k_s учитывают длительность действия нагрузки. По приведенной выше формуле можно вычислить нормативное теоретическое значение жесткости соответствующего элемента. Ввиду того, что конструкции испытывались на непродолжительное (кратковременное) действие нагрузки, далее сравнение экспериментальных данных с нормативным будет выполняться для модуля бетона E_{b1} .

График зависимости жесткости D от приложенного приведенного момента M/M_{ult} для простых балок приведен на рис. 3, тавровых балок – на рис. 4 (M_{ult} – предельный момент, действующий в балке и соответствующий ее разрушению при испытаниях). Жесткость D для прямоугольных и тавровых балок построена путем осреднения экспериментальных прогибов при одинаковых значениях приведенных моментов по трем одинаковым испытанным балкам группы.

Частично обетонированные балки прямоугольного сечения (группы М2.1, М2.2, М2.3) имеют график жесткости D , который можно условно разделить на 3 участка (рис. 3): первоначальное падение жесткости при моментах от 0 до $0,2 M/M_{ult}$; нормальная работа, когда жесткость имеет практически одно и то же значение при моментах от $0,2$ до $0,8 M/M_{ult}$; начало разрушения и переход к предельному состоянию при моментах от $0,8$ до $1 M/M_{ult}$.

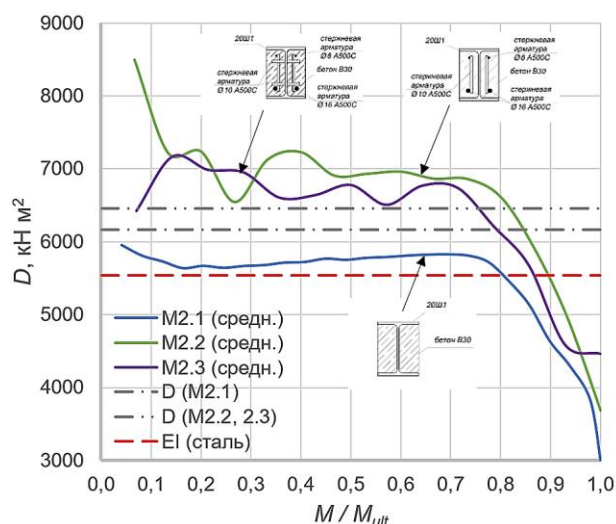


Рис. 3. Жесткость простых частично обетонированных балок прямоугольного сечения
Fig. 3. Rigidity of simple partially concreted beams with rectangular cross section

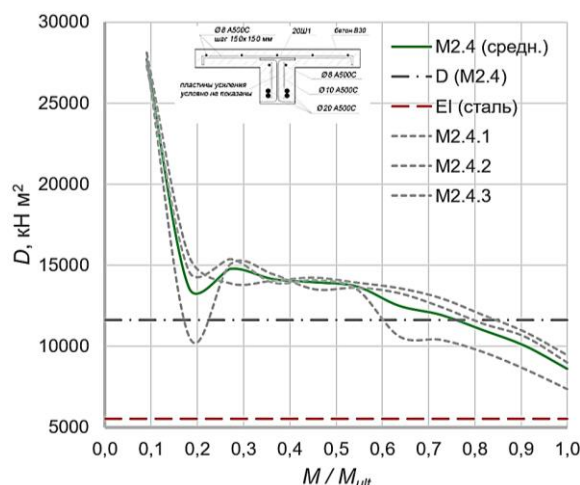


Рис. 4. Жесткость простых частично обетонированных балок таврового сечения
 Fig. 4. Rigidity of simple partially concreted T-beams

Сравним значения жесткостей балок на участке нормальной работы с нормативными значениями (табл. 1). Балки без дополнительного продольного армирования бетона (модели балок M2.1) показывают значение жесткости на 7,4 % ниже, чем по формуле Г.11 СП 266.1325800.2016. Жесткость сталежелезобетонной конструкции по сравнению с простой стальной балкой при этом больше всего на 3,5 % (красный пунктир на рис. 3). Прочности сцепления контактной поверхности «сталь – бетон» и дополнительных сил трения, возникающих между бетоном и внутренней поверхностью полки двутавра, недостаточно для обеспечения совместной работы стали и бетона.

Балки с дополнительным продольным армированием, в том числе с установленными гибкими упорами по стенке двутавра (модели балок M2.2, M2.3), показывают большие значения жесткости на 3,5...6,8 %, чем по формуле Г.11 СП 266.1325800.2016. При этом дополнительное продольное армирование бетона позволяет увеличить жесткость конструкции на 17,2...20,0 % по сравнению со стальной балкой. Экспериментально полученные значения жесткости для данных групп балок практически не отличаются (6928 кНм² для M2.2 и 6690 кНм² для M2.3 с упорами). Это позволяет заключить, что установка упоров по стенке не является эффективным способом увеличения степени совместной работы стали и бетона. Все модели сталежелезобетонных балок на участке начала разрушения при переходе к предельному состоянию (при моментах от 0,8 до 1 M/M_{ult}) показывают резкое снижение жесткости в среднем до 3 700 кНм², что составляет около 60 % от «нормативной» жесткости по формуле Г.11 СП 266.1325800.2016. Подчеркнем, что разрушение комбинированной изгибаемой сталежелезобетонной конструкции, которое сопровождается развитием пластических деформаций в полках двутавра, разрушением сжатого бетона и контактной зоны «сталь – бетон», не приводит к «обнулению» ее жесткости.

Тавровые балки (группа M2.4), так же как и частично обетонированные, имеют график жесткости D , который можно условно разделить на 3 участка

с такими же границами (рис. 4). Отличие заключается в том, что на участке нормальной работы от 0,2 до $0,8 M/M_{ult}$ жесткость не является постоянной, а плавно снижается до «нормативного» значения. Балки с шириной бетонной полки $L/4$ показывают фактическую жесткость на участке нормальной работы на 11,8 % больше, чем по формуле Г.11 СП 266.1325800.2016. Остаточная жесткость тавровой сталежелезобетонной балки при наступлении предельного состояния составляет 73 % (8608 кНм^2) от жесткости по формуле Г.11 СП 266.1325800.2016.

Таблица 1

Table 1

Группа моделей	Участок нормальной работы	D на участке норм. работы, кНм^2	D по СП 266, кНм^2	$1 - \frac{D_4}{D_3}$	$1 - \frac{EI_{st}}{D_3}$
M2.1	$0,2 \dots 0,8 M/M_{ult}$	5742	6168	-7,4 %	3,5 %
M2.2	$0,2 \dots 0,8 M/M_{ult}$	6928	6456	6,8 %	20,0 %
M2.3	$0,2 \dots 0,8 M/M_{ult}$	6690	6456	3,5 %	17,2 %
M2.4	$0,2 \dots 0,8 M/M_{ult}$	13 199	11 639	11,8 %	58,0 %

Модели полноразмерных перекрытий M3.1 и M3.2, каждое из которых было испытано в двух экземплярах, работают несколько иначе, чем простые балки. График жесткости D можно условно разделить на 2 участка (рис. 5 и 6): первоначальное падение жесткости примерно на порядок при моментах от 0 до $0,5 M/M_{ult}$; жесткость имеет практически одно и то же значение при моментах от 0,5 до $1,0 M/M_{ult}$. Третий участок работы комбинированной балки, предшествующий наступлению предельного состояния, отсутствует ввиду того, что разрушение перекрытия наступало по железобетону сборных железобетонных плит, а не по элементам сталежелезобетонной конструкции.

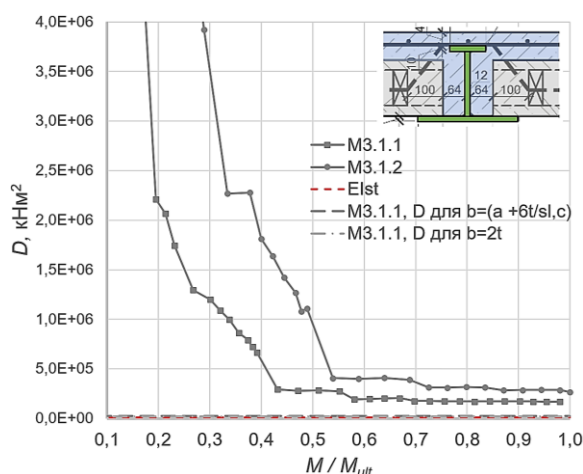


Рис. 5. Жесткость средней балки моделей перекрытий M3.1 с опиранием плит на нижний пояс
Fig. 5. Rigidity of middle beam M3.1 with plates resting on the lower belt

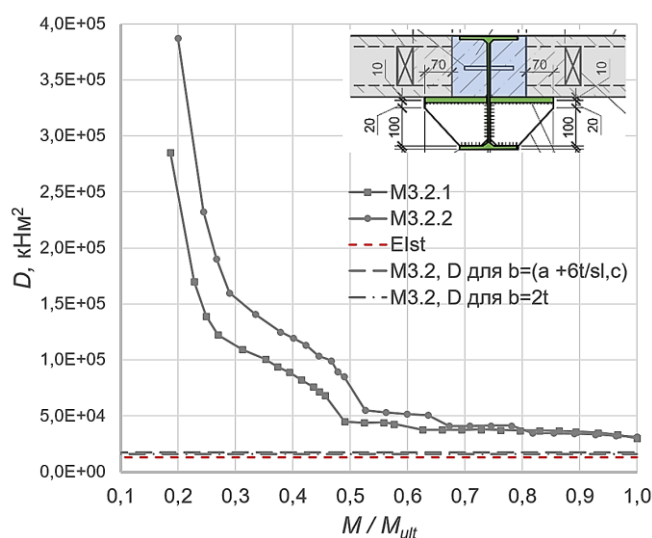


Рис. 6. Жесткость средней балки моделей перекрытий М3.1 с опиранием плит на нижний пояс
Fig. 6. Rigidity of middle beam M3.1 with plates resting on the lower belt

Анализ полученных при испытаниях результатов показывает существенное превышение значений жесткости относительно ожидаемых по формуле Г.11 СП 266.1325800.2016 (табл. 2). Так, для моделей перекрытия при наличии армированной набетонки сверху сборных плит характерно превышение фактической жесткости относительно «нормативной» в 7 раз (модель М3.1.1, монолитный бетон В35) и в 14,8 раза (модель М3.1.2, монолитный бетон В43). Для моделей М3.2, которые имеют только омоноличивание торцов плиты и пазухи между плитами и стальной балкой бетоном В35, превышение фактической жесткости относительно «нормативной» составляет 2,3 раза.

Таблица 2
Table 2

Группа моделей		Участок нормальной работы	D на участке норм. работы, кНм ²	D по СП 266, кНм ²	EI_{st} , кНм ²	$\frac{D_3}{D_4}$	$\frac{D_3}{EI_{st}}$
М3.1.1	В35	0,5...1,0 M/M_{ult}	191 321	26 979	9046	7,1	21,2
М3.1.2	В43	0,5...1,0 M/M_{ult}	384 168	25 966	9046	14,8	42,5
М3.2	В35	0,5...1,0 M/M_{ult}	39 642	17 432	13 118	2,3	3,0

Как видно из представленных графиков (рис. 5 и 6), а также данных табл. 2, включение монолитного и сборного железобетона позволяет увеличить жесткость конструкции при наличии армированной набетонки до 21...42 раз (модель М3.1), а при ее отсутствии – до 3 раз (модель М3.2) по сравнению со стальной балкой. Данное существенное отличие ожидаемых и фактических величин жесткости объясняется тем, что модели перекрытий работают по пространственной

схеме, а главные балки, изгибаясь, вовлекают в пространственную работу элементы железобетонного настила, который до разрушения связей между ними и стальной конструкцией работает как ортотропная оболочка. Это в большей степени справедливо для модели перекрытия, имеющего сверху настила армированную набетонку (МЗ.1), где отмечена максимальная разница между экспериментальным и «нормативным» значением жесткости балочного элемента.

Моделирование отдельных балок перекрытий как в расчетных комплексах, так и в экспериментах не могут достоверно спрогнозировать работу перекрытий, которые являются пространственными конструкциями. При сравнении работы тавровой балки (М2.4), которая наиболее близко моделирует среднюю балку перекрытия, с работой такой же балки полноразмерного перекрытия (МЗ.1) установлено, что в отдельной балке не возникает «поддерживающего» эффекта от оболочки перекрытия, и она работает так, как и ожидается для простой балки. В то же время для оценки несущей способности всего перекрытия, выявления достоверной картины его работы необходимо моделирование участка перекрытия с необходимым количеством ячеек. Выводы о резервах несущей способности или эффективности работы того или иного конструктивного решения можно делать только по результатам моделирования участка перекрытия, а не отдельных балок.

Б. Прогибы и развитие трещин

В развитие анализа полученных экспериментальных результатов по жесткости конструкций разных масштабов и степени детализации необходимо проанализировать прогибы перекрытий и отдельных испытанных конструкций. Для того, чтобы можно было сравнить прогибы от моментов в конструкциях различных пролетов, приведем прогибы к безразмерной величине f/L , где f – значение прогиба, а L – пролет конструкции. На рис. 7 представлены графики зависимости относительных значений прогиба от моментов для всех испытанных на изгиб конструкций: простых частично обетонированных балок (М2.1, М2.2, М2.3, М2.4) и моделей перекрытий (МЗ.1, МЗ.2).

В табл. 3 приведены значения предельных моментов, полученных при испытаниях M_{ult} , и их сравнение с теоретическими значениями предельных моментов по нормам на сталежелезобетонные конструкции ($M_{ult(СП266)}$).

Сравнение показывает, что простые частично обетонированные балки (М2.1...М2.4) имеют запас по несущей способности от 19 до 23 %.

Балки без дополнительной стержневой арматуры (М2.1) имеют сопоставимый запас с остальными армированными балками (М2.2...М2.4), что свидетельствует о том, что установка дополнительной арматуры в монолитные части комбинированной конструкции поднимает ее несущую способность незначительно. Несмотря на то, что расчет по предельным состояниям 1-й группы дает запас относительно результатов испытаний, расчет жесткости таких конструкций запаса не имеет (см. табл. 1 и рис. 3). Наличие арматуры улучшает трещиностойкость конструкций: балки без дополнительной арматуры (М2.1) имеют ширину раскрытия трещин более нормативного значения 0,3 мм при значениях момента $M_{ult(СП266)}$. Для балок с дополнительным продольным армированием

М2.1...М2.4 трещины не превышают данного значения, и в прямоугольных балках раскрытие трещин составляет 0,13...0,18 мм, а в тавровой балке – 0,29 мм.

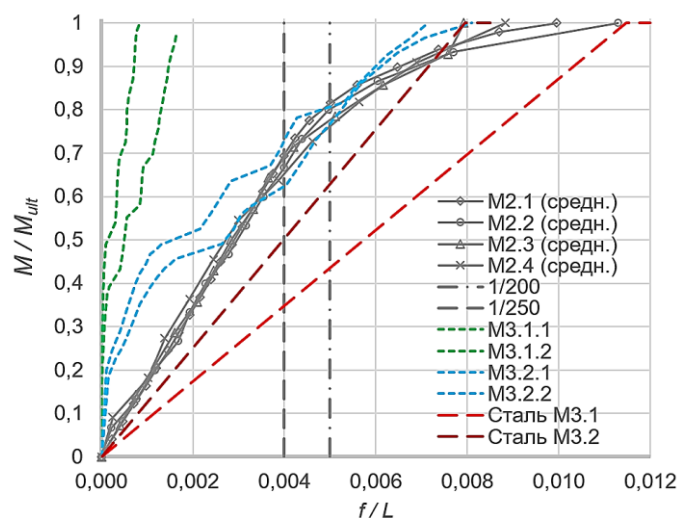


Рис. 7. Прогиб простых частично обетонированных балок и средних балок полноразмерных перекрытий М3.1 и М3.2

Fig. 7. Deflection of simple partially concreted and medium beams of full-size floors M3.1 and M3.2

Таблица 3

Table 3

Группа моделей	Предельный момент по испытаниям M_{ult} , кНм	Предельный момент по СП 266 $M_{ult(СП266)}$, кНм	$\frac{M_{ult(СП266)}}{M_{ult}}$	f / L при $M_{ult(СП266)}$	a_{crs} при $M_{ult(СП266)}$, мм
М2.1	111,4	86,3	0,77	0,0045	0,37
М2.2	142,7	111,4	0,78	0,0050	0,13
М2.3	138,1	111,4	0,81	0,0057	0,18
М2.4	270,1	212,6	0,79	0,0056	0,29
М3.1.1 (В43)	452,0	321,3	0,71	0,0012	—
М3.1.2 (В35)	362,0	315,2	0,87	0,00074	—
М3.2 (средн.)	375,0	324,5	0,86	0,0059	—

На рис. 8 приведены результаты замеров раскрытия трещин на всех этапах испытаний балок. Видно, что показатели раскрытия трещин для балок М2.1.1...М2.1.3 (без продольной арматуры) не попадают в границы, очерченные вертикальной линией (0,3 мм) и горизонтальной линией ($\frac{M_{ult(СП266)}}{M_{ult}} = 0,8$).

Данное обстоятельство говорит о том, что такие балки не попадают в «нормативные границы» прочности и раскрытия трещин. Сверхнормативные трещины образуются в них при меньших нагрузках, чем наступает первое предельное состояние, а значит, проектирование оптимальных частично обетонированных конструкций без стержневой арматуры будет затруднительно.

Для всех конструкций, кроме перекрытия с армированной набетонкой МЗ.1, характерна практически линейная работа в диапазоне усилий от 0 до $0,7 \dots 0,8 M/M_{ult}$. То есть прогибы линейно увеличиваются при увеличении момента. При моментах свыше $0,8 M/M_{ult}$ начинается участок значительных упругопластических деформаций конструкций. Работа при моментах свыше $0,8 M/M_{ult}$, как было показано выше, сопровождается резким падением жесткости конструкции и ее переходом в предельное состояние. На рис. 7 видно, что перекрытие МЗ.2 (без набетонки) по критерию прогибов на начальных этапах нагружений (до $0,5 M/M_{ult}$) работает как оболочка и только при начале трещинообразования начинает работать как балочная система. График деформации средней балки перекрытия МЗ.2 (голубые пунктирные линии) огибает графики деформаций простых балок (серые линии с маркерами). Средняя балка перекрытия МЗ.1 с набетонкой (зеленая пунктирная линия) продолжает работать линейно даже при приближении к предельным значениям моментов, т. к. при испытаниях не было достигнуто предельное состояние комбинированной балки, а разрушения произошли по наклонным трещинам сборных плит настила. Таким образом, при нагрузках до $0,8 M/M_{ult}$ прогибы комбинированных частично обетонированных статически определимых конструкций могут быть вычислены по простейшим формулам строительной механики с учетом приведенной жесткости D по СП 266.1325800.2016, а построения сложных численно-аналитических моделей (как, например, в работах [3, 9, 14, 15]) не требуется.

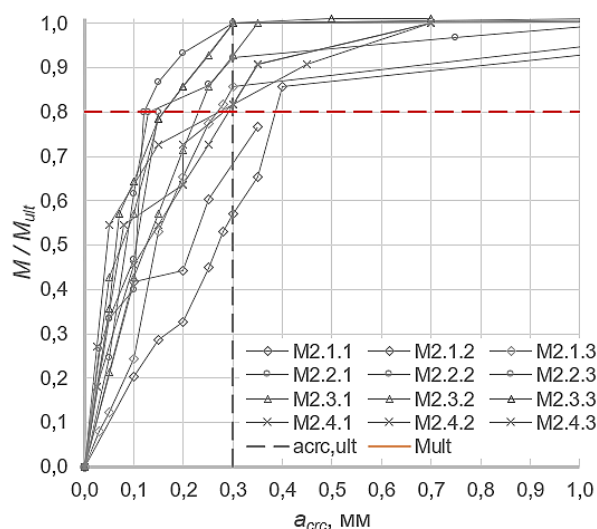


Рис. 8. Диаграмма развития трещин в бетонной части частично обетонированных балок
Fig. 8. Crack development in concrete of partially concreted beams

Выводы

При расчетах сталежелезобетонных конструкций по второму предельному состоянию для определения прогибов с достаточной точностью можно пользоваться известными формулами вычисления прогибов. Жесткость для определения прогибов следует принимать в соответствии с правилами Г.11 СП 266.1325800.2016. Для простых конструкций, которые не предполагают пространственную работу (жесткость по одному из направлений существенно превышает жесткость по другому), точность вычислений жесткости и, соответственно, прогибов будет составлять примерно 10 %. Причем расчётные формулы будут давать запас. Жесткость элементов, не армированных стержневой арматурой, а имеющих только жесткую арматуру в виде сварных или прокатных профилей, следует дополнительно понижать на 15 % относительно нормативного значения жесткости по СП 266.1325800.2016.

Наличие гибких упоров по стенке стальной балки в сталежелезобетонной конструкции не приводит к какому бы то ни было увеличению жесткости комбинированной конструкции. Наличие продольной арматуры в пазах двутавровых балок при обетонировании сборных элементов существенно повышает эффективность работы комбинированной конструкции. Косвенно наличие продольной арматуры повышает прочность сцепления контактной поверхности «сталь – бетон» и увеличивает дополнительные силы трения, возникающие между бетоном и внутренней поверхностью полки двутавра.

Разрушение комбинированной изгибаемой сталежелезобетонной конструкции, которое сопровождается развитием пластических деформаций в полках двутавра, разрушением сжатого бетона и контактной зоны «сталь – бетон», не приводит к «обнулению» ее жесткости. Остаточная жесткость балки при достижении ею предельного состояния по прочности составляет не менее 60–70 % от ее «нормативного» значения. Этот ресурс жесткости комбинированной конструкции может быть использован при расчетах зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лоусон Р.М., Огден Р.Дж., Рэкхэм Дж.В. Сталь в многоэтажных жилых зданиях. Институт стальных конструкций. (SCI) Silwood Park, Ascot, Berkshire SL5 7QN (Великобритания), 2004. – 68 с. (Публикация SCI P332).
2. Ahmed I.M., Tsavdaridis K.D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and eurocode design approaches // Journal of Constructional Steel Research. 2019. № 155. P. 286–300.
3. Rackham J.W., Hicks S.J., Newman G.M. Design of Asymmetric Slimfloor Beams with Precast Concrete Slabs. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2006. 101 p. (SCI Publication P342).
4. Braun M. Experimentelle Untersuchungen von Slim-Floor-Trägern in Verbundbauweise. Untersuchungen zur Verbundwirkung von Betondübeln // Stahlbau 83. 2014. Heft 10. P. 746–754; Heft 5. P. 302–308.
5. Туснин А.Р., Коляго А.А. Конструкция и работа сталежелезобетонного перекрытия с использованием сборных пустотных железобетонных плит // Современная наука и инновации. 2016. № 3. С. 141–147.
6. Замалиев Ф.С., Филиппов В.В. Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 29–36.

7. Ferreira F.P.V., Tsavdaridis K.D., Martins C.H., De Nardin S. Steel-Concrete-Composite Beams with Precast Hollow-Core Slabs: A Sustainable Solution // Sustainability. 2021. 13. 4230. URL: <https://doi.org/10.3390/su13084230>
8. Goralski C.R. Zusammenwirken von Beton und Stahlprofil bei kammerbetonierten Verbundträgern: PhD Dissertation. Aachen, Germany, 2006. 218 p.
9. Hicks S.J., Lawson R.M. Design of Composite Beams Using Precast Concrete Slabs. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2003. 98 p. (SCI Publication P287).
10. Замалиев Ф.С., Биккинин Э.Г. и др. Экспериментальные исследования начального напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок и плит // Известия КГАСУ. 2015. № 2 (32). С. 149–153.
11. Lam D. Composite steel beams using precast concrete hollow core floor slabs : PhD thesis. Dennis Lam. University of Nottingham, UK, 1998. 303 p.
12. Lam D. Designing composite beams with precast hollowcore slabs to Eurocode 4 // Advanced Steel Construction. 2007. V. 3. № 2. P. 594–606.
13. Way A.G.J., Cosgrove T.C., Brettle M.E. Precast Concrete Floors in Steel Framed Buildings. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2007. 101 p. (SCI Publication P351).
14. Боровиков А.Г., Боровикова Н.А. Оценка напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок со сквозной стенкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 219–225.
15. Веселов А.А., Чепилко С.О. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонной балки // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 2 (23). С. 31–37.

REFERENCES

1. Lawson R.M., Ogden R.J., Rackham J.W. Steel in multi-storey residential buildings. Institute of Steel Structures. Silwood Park, Ascot, Berkshire SL5 7QN (UK), 2004. 68 p. Publication SCI P332.
2. Ahmed I.M., Tsavdaridis K.D. The evolution of composite flooring systems: Applications, testing, modelling and Eurocode design approaches. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; (155): 286–300.
3. Rackham J.W., Hicks S.J., Newman G.M. Design of asymmetric slim floor beams with precast concrete slabs. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2006. 101 p. (SCI Publication P342).
4. Braun M. Experimental investigations of slim-floor beams in composite construction. *Investigations on the composite effect of concrete dowels*. 2014; 83 (10): 746–754; (5): 302–308.
5. Tusnin A.R., Kolyago A.A. Construction and operation of steel-reinforced concrete floor using prefabricated hollow reinforced concrete slabs. *Sovremennaya nauka i innovatsii*. 2016; (3): 141–147. (In Russian)
6. Zamaliev F.S., Filippov V.V. Computational and experimental studies of steel-reinforced concrete structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (7): 29–36. (In Russian)
7. Ferreira F.P.V., Tsavdaridis K.D., Martins C.H., De Nardin S. Steel-concrete-composite beams with precast hollow-core slabs: A sustainable solution. *Sustainability*. 2021; 13: 4230. Available: doi.org/10.3390/su13084230
8. Goralski C. Interaction of concrete and steel profile in the case of chamber-reinforced composite beams. PhD Thesis. Aachen, Germany, 2006. 218 p.
9. Hicks S.J.R., Lawson M. Design of composite beams using precast concrete slabs. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2003. 98 p. (SCI Publication P287).
10. Zamaliev F.S., Bikkinin E.G., et al. Experimental studies of the initial stress-strain state of steel-reinforced concrete beams and plates. *Izvestiya KGASU*. 2015; 2 (32): 149–153. (In Russian)
11. Lam D. Composite steel beams using precast concrete hollow core floor slabs: PhD Thesis. University of Nottingham, UK, 1998. 303 p.
12. Lam D. Designing composite beams with precast hollowcore slabs to Eurocode 4. *Advanced Steel Construction*. 2007; 3 (2): 594–606.
13. Way A.G.J., Cosgrove T.C., Brettle M.E. Precast concrete floors in steel framed buildings. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2007. 101 p. (SCI Publication P351).

14. Borovikov A.D., Borovikova N.A. Evaluation of stress-strain state of open-web composite beams. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (3): 219–225. (In Russian)
15. Vezelov A.A., Chepilko S.O. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete beam. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2010; 2 (23): 31–37. (In Russian)

Сведения об авторе

Конин Денис Владимирович, канд. техн. наук, Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко АО «НИЦ “Строительство”», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, konden@inbox.ru

Author Details

Denis V. Konin, PhD, Koucherenko Central Research Institute of Civil Structures, 6, 2nd Institutskaya Str., 109428, Moscow, Russia, konden@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 01.06.2023
Одобрена после рецензирования 09.06.2023
Принята к публикации 13.06.2023

Submitted for publication 01.06.2023
Approved after review 09.06.2023
Accepted for publication 13.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 143–150.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 143–150.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.151.2:624.131.543(571.16)

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-143-150

EDN: GCUAQH

РАЗВИТИЕ ОСАДОК ЗДАНИЙ ПРИ ПОНИЖЕНИИ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ОПОЛЗНЕВОЙ ТЕРРИТОРИИ ЛАГЕРНОГО САДА В Г. ТОМСКЕ

**Сергей Васильевич Юшубе, Александр Александрович Тарасов,
Артем Сергеевич Устюгов**

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

Аннотация. *Актуальность.* Одним из методов стабилизации оползневых склонов является понижение уровня грунтовых вод. При этом вопрос влияния водопонижения на техническое состояние уже существующих зданий изучен недостаточно. Учет данного фактора непосредственно оказывает влияние на техническое состояние зданий и сооружений, т. к. помогает предотвратить развитие дополнительных деформаций фундаментов и грунтов основания.

Цель работы. Оценить влияние устройства дренажной горной выработки со сквозными фильтрами на техническое состояние зданий, попадающих в зону водопонижения.

Методы исследования. Изучение результатов многолетних натурных наблюдений за уровнем грунтовых вод на участке водопонижения, результатов мониторинга за техническим состоянием зданий, анализ и обобщение полученных данных.

Результаты работы. В статье приведены сведения о выполненных работах по оценке влияния водопонижения грунтовых вод территории, прилегающей к оползневому склону, на техническое состояние зданий и сооружений на примере комплекса объектов одной из томских больниц. Оценка осуществлялась по результатам годового мониторинга за плано-высотным положением строительных конструкций, наблюдением за изменением состояния строительных конструкций, а также анализа материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных на данной площадке в период с 1987 по 2020 г. В результате проведенного комплекса работ было установлено, что водопонижение привело к развитию неравномерных деформаций строительных конструкций и снижению их технического состояния вследствие неравномерного доуплотнения грунтов в пределах зоны водопонижения.

Выводы. Водопонижение грунтовых вод вблизи существующих зданий и сооружений может существенно сказаться на их техническом состоянии вследствие доуплотнения грунта даже на значительном расстоянии от водопонижающих устройств. При разработке проектов водопонижения грунтовых вод особое внимание следует уделять анализу неоднородности грунтовой толщи в пределах пятна застройки и оценке её влияния на формирование относительных деформаций и кренов частей зданий относительно друг друга.

Ключевые слова: водопонижение, техническое состояние, мониторинг, наблюдение за осадками, сверхнормативные осадки, неравномерные осадки

Для цитирования: Ющубе С.В., Тарасов А.А., Устюгов А.С. Развитие осадок зданий при понижении грунтовых вод на оползневой территории Лагерного сада в г. Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 143–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-143-150. EDN: GCUAQH

ORIGINAL ARTICLE

BUILDING FOUNDATION SETTLEMENT IN GROUNDWATER LOWERING ON SLIDING TERRITORY OF LAGERNY GARDEN IN TOMSK

Sergei V. Yushchube, Aleksandr A. Tarasov, Artem S. Ustyugov
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Groundwater lowering is a method of stabilizing landslide slopes. To date, the effect of water reduction on the technical condition of buildings has not been sufficiently studied. This may negatively affect the technical condition of buildings due to the development of additional deformation of foundations and foundation soils.

Purpose: The aim of this work is to assess the impact of cased hole with filters on the technical condition of buildings in the area of groundwater lowering.

Methodology/approach: Long-term field observations of the groundwater level at the water supply site; monitoring of the technical condition of buildings; analysis and generalization of the data obtained.

Research findings: Based on annual monitoring of the building height, monitoring of changes in the building state and the engineering and geological analysis are performed in the period from 1987 to 2020. It is found that groundwater lowering leads to building deformation and a decrease in its technical condition due to nonuniform soil compaction in this area.

Research implication: Groundwater lowering near buildings can significantly affect their technical condition due to the soil compaction even at a considerable distance from the water-lowering devices. In developing groundwater lowering projects, special attention should be paid to heterogeneity of the ground layer on the building site and its impact on the formation of relative deformation of buildings.

Keywords: groundwater lowering, technical condition, monitoring, excess settlement, differential settlement

For citation: Yushchube S.V., Tarasov A.A., Ustyugov A.S. Building foundation settlement in groundwater lowering on sliding territory of Lagerny Garden in Tomsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 143–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-143-150. EDN: GCUAQH

Введение

Подземные воды – важный элемент гидрогеомеханической системы. Перемена их типичного режима влечет за собой изменение физико-механических свойств грунтов не только в зоне водопонижения, но и оказывает влияние на весь грунтовый массив. Так, понижение уровня грунтовых вод может привести к изменению отметок дневной поверхности земли вследствие доуплотнения грунтов, тем самым спровоцировав дополнительные деформации зданий и сооружений. Повышение уровня часто приводит к снижению прочностных и деформационных характеристик грунтов, что также неблагоприятно сказывается на тех-

ническом состоянии строительных конструкций. Такие явления отмечены как в работах отечественных [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], так и зарубежных ученых [8]. В качестве примера такого влияния приведены результаты обследования и мониторинга комплекса зданий городской больницы в г. Томске.

Инженерно-геологические условия

В административном отношении площадка расположения зданий больницы находится в южной части г. Томска в районе Лагерного сада. В геоморфологическом отношении территория строительства приурочена к правому берегу р. Томи и к окраинной части склона Томь-Яйского междуречья. В пределах рассматриваемого участка выделяются следующие геоморфологические элементы: водораздельное плато, оползневый склон правого берега р. Томи и пойма р. Томи. Рельеф пологоволнистый, абсолютные отметки поверхности земли изменяются на плато от 132,0 до 76,0 м на склоне. Правобережный эрозионный склон Томи, прилегающий к рассматриваемому участку, осложнен оползневыми цирками, которые разделены узкими межоползневыми гребнями. Оползневые тела и овраги образованы по осям тектонических нарушений высоких порядков, опояривающих тектонические разломы вдоль правого берега р. Томи.

В геологическом строении до глубины 45–50 м принимают участие верхне- и среднечетвертичные озерно-аллювиальные отложения, неоген-палеогеновые отложения, представленные элювиальными отложениями коры выветривания глинистых сланцев мел-палеогенового возраста и нижне-карбонического возраста. По состоянию на 1980-е гг. было выявлено несколько горизонтов грунтовых вод. Техногенные подземные воды вскрыты на глубинах 0,5–11,5 м. Водовмещающими грунтами являются преимущественно супеси, а локальными водупорами – суглинки и глины. Палеоген-неогеновый водоносный горизонт вскрыт в интервале глубин 22,1–25,8 м. Водовмещающими грунтами являются пески различной крупности с линзами суглинка. Водупором служат глины и суглинки коры выветривания палеозойских глинистых сланцев. Ниже обнаружены палеозойские подземные воды, приуроченные к зонам тектонического дробления. По условиям залегания эти воды относятся к трещинному типу, имеют хорошо выраженный напорный характер. В пределах зон тектонических нарушений грунты обладают пониженной прочностью и повышенным водонасыщением¹.

Для инженерной защиты склона в 1992–2006 гг. были разработаны и внедрены противооползневые мероприятия, включающие в том числе устройство на глубине 48–50 м от поверхности плато дренажной горной выработки (ДГВ) с вертикальными дренажными скважинами круглогодичного действия [2, 3, 9]. При этом одна из ветвей ДГВ (рис. 1) проходит в непосредственной близости от рассматриваемых зданий (40–150 м). Анализ материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных в 1980-х гг. и в 2020 г., показал, что ввод ДГВ в эксплуатацию позволил существенно понизить уровень грунтовых вод, в том числе и на площадке расположения рассматриваемых зданий [10, 11].

¹ Анализ влияния геологических процессов на техническое состояние конструкций зданий городской больницы № 3 по ул. Нахимова, 3, в г. Томске // Технический отчет. 2021. С. 5–46.

Так, по состоянию на 2020 г. в пределах глубины 20 м грунтовые воды обнаружены не были, а глинистые грунты в верхней части разреза перешли из мягкопластичного – текучего в тугопластичное – твердое состояние². Сопоставление инженерно-геологических условий рассматриваемой площадки по состоянию на 1987–2020 гг. приведено на рис. 2.

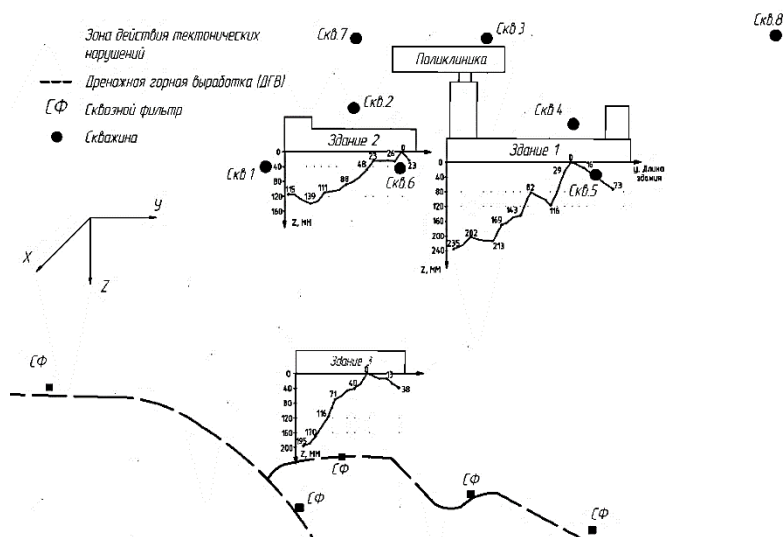


Рис. 1. Взаимное расположение рассматриваемых зданий, тектонических нарушений и дренажной горной выработки

Fig. 1. Mutual location of buildings, tectonic faults, and drainage excavation

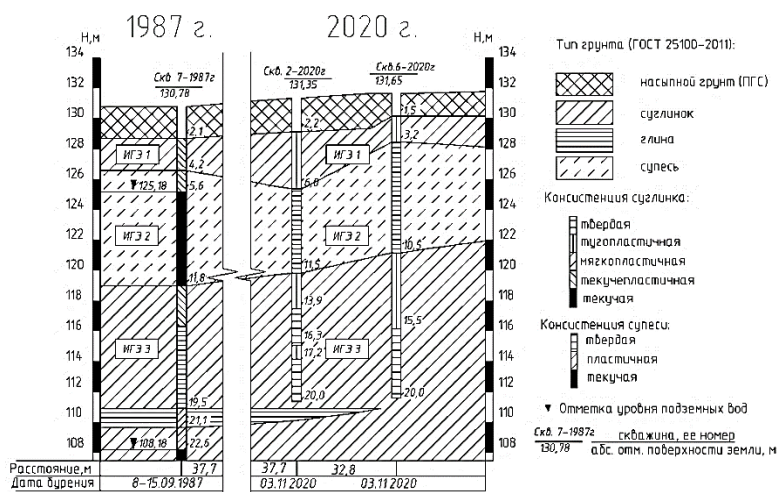


Рис. 2. Инженерно-геологические условия площадки расположения зданий по состоянию на 1987–2020 гг.

Fig. 2. Engineering and geological conditions of building site in 1987–2020

² О результатах мониторинга зданий ОГАУЗ «ГКБ № 3 им. Б.И. Альперовича», расположенных по адресам: г. Томск, ул. Нахимова, 3, и г. Томск, ул. Нахимова, 3, стр. 1 // Технический отчет. 2021. С. 5–114.

Краткая характеристика комплекса зданий

Рассматриваемый комплекс представлен несколькими разноэтажными зданиями высотой от 3 до 5 этажей. Конструктивная схема зданий – с продольными и поперечными несущими кирпичными стенами. Здания имеют сложную форму в плане. Пространственная жесткость обеспечивается совместной работой стен, дисков железобетонных перекрытий и фундаментов. Фундаменты зданий ленточные сборные на естественном основании мелкого заложения глубиной 3–3,5 м от уровня планировки, а также ленточные свайные из призматических забивных свай заводского изготовления.

По состоянию на 2020 г. строительные конструкции зданий имеют многочисленные дефекты и повреждения. Основными и наиболее распространенными дефектами являются сквозные вертикальные и наклонные трещины в продольных стенах зданий, характер и расположение которых указывают на наличие сверхнормативных и неравномерных деформаций оснований фундаментов зданий.

Результаты мониторинга и анализ материалов изысканий

По результатам геодезических наблюдений было установлено, что разность деформаций фундамента зданий в абсолютных значениях достигает 235 мм, а в относительном эквиваленте – 0,0056 [12]. При этом изменения высотного положения контрольных марок в течение года не выявлено, что указывает на стабилизацию деформации на момент наблюдений. Проверочные расчеты с использованием схемы в виде линейно-деформируемого полупространства показали, что расчётные осадки фундаментов зданий не превышают 30 мм, а разность осадок – 0,001. Очевидно, что зафиксированные в процессе работ значения разности деформаций нельзя объяснить только осадками фундаментов зданий от приложенных к ним нагрузок [13].

Сравнение физико-механических характеристик грунтов, находящихся в зоне водопонижения, показало, что за указанный период произошло значительное изменение их свойств [14]. Так, влажность для суглинков в среднем уменьшилась на 16–22 %, а для супеси – на 55 %, в то время как плотность сухого грунта увеличилась на 5–7 % (табл. 1). Таким образом, водопонижение грунтовых вод привело к значительному уплотнению грунтов в верхней части разреза, оседанию дневной поверхности, а следовательно, и к дополнительным деформациям зданий. Однако равноудаленность участков зданий от дренажных скважин, доуплотнение грунтов вследствие водопонижения не объясняют в полной мере наличия существенной разности осадок фундаментов по длине зданий, зафиксированной в ходе мониторинга. Сопоставление данных о разности осадок зданий с расположением зон тектонических нарушений показало, что участки зданий с максимальными деформациями явно тяготеют к зонам тектонических нарушений. Сравнение данных об изменении плотности грунта по отдельным скважинам, находящимся в зонах тектонических нарушений и за их пределами, позволило выявить, что среднее изменение плотности скелета грунтов на этих участках отличается на 2,6–2,9 % (табл. 2). С учетом мощности грунтов в границах водопонижения такое расхождение

в доуплотнении грунтов дает разность осадок около 200 мм, что хорошо согласуется с данными мониторинга (см. рис. 1).

Таблица 1

Сравнение средних показателей физико-механических характеристик грунтов по состоянию на 1987–2020 гг.

Table 1

Average values of physical and mechanical properties of soils in 1987–2020

ИГЭ	Плотность сухого грунта, т/м ³		Коэффициент пористости		Влажность	
	1987 г.	2020 г.	1987 г.	2020 г.	1987 г.	2020 г.
1	1,51	1,59	0,788	0,70	27,03	22,6
2	1,6	1,71	0,693	0,58	24,49	10,9
3	1,5	1,59	0,798	0,71	29,44	22,9

Таблица 2

Сопоставление степени доуплотнения грунтов в зонах с тектоническими нарушениями и за их пределами

Table 2

Additional soil compaction in and outside tectonic fault areas

ИГЭ	Изменение плотности грунтов в зонах с тектоническими нарушениями за период с 1987 по 2020 г., %					Изменение плотности грунтов в зонах без тектонических нарушений за период с 1987 по 2020 г., %			Разность изменения плотности в зонах с тектоническими нарушениями и за их пределами
	Скв. 1	Скв. 2	Скв. 3	Скв. 4	Среднее по скв. 1–4	Скв. 5	Скв. 6	Среднее по скв. 5, 6	
1	9,15	9,15	12,54	8,14	9,75	6,33	7,33	6,83	2,91
2	8,77	9,09	11,63	9,73	9,80	6,91	7,45	7,18	2,62

Заключение

Таким образом, в результате выполненного комплекса работ было установлено, что водопонижение грунтовых вод вблизи зданий и сооружений может существенно сказаться на их техническом состоянии вследствие доуплотнения грунта даже на значительном расстоянии от водопонижающих устройств. При разработке проектов водопонижения грунтовых вод особое внимание следует уделять анализу неоднородности грунтовой толщи в пределах пятна застройки и оценке её влияния на формирование относительных деформаций и кренов частей зданий относительно друг друга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев А.П. О деформациях в глубоких горизонтах грунтовых массивов на участках водопонижения // Гидрогеология и карстоведение : межвузовский сб. научных трудов. Пермь, 2009. С. 224–231.
2. Гальперин А.М., Семенова Е.А. Прогноз геомеханических процессов на горных предприятиях на основе теории консолидации породных массивов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016. № 2. С. 111–120.
3. Гальперин А.М., Мосейкин В.В., Пуневский С.А., Семенова Е.А. Проблемы геомеханики и инженерной геологии в техногенных массивах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S1. С. 5–13.
4. Карпенко Н.П., Беглярова Э.С., Соколова С.А., Матвеева Т.И. Фильтрационные расчеты водопонижения при строительстве инженерных коммуникаций // Природообустройство. 2021. № 1. С. 126–133.
5. Коноплянцев А.А., Ярцева Е.Н. Оседание поверхности земли в связи с понижением уровня подземных вод // Обзор ВИМС, гидрогеология и инженерная геология. Москва, 1983. 48 с.
6. Гольц С.И. Влияют ли откачки подземных вод на оседание земной поверхности территории Москвы и Подмоскovie // Бюллетень МОИП, отд. геол. 1972. № 47. С. 42–51.
7. Нуриджанян С.Ш., Саркисян В.С., Хачатурян Г.Т. Прогноз оседания земной поверхности при осушении грунтов // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. № 6. С. 1330–1333.
8. Фи Х.Т., Строчкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности при водопонижении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 4. С. 6–17.
9. Ольховатенко В.Е. Геоэкологические проблемы г. Томска и разработка мероприятий по инженерной защите территории // Обской вестник. Новосибирск : Научно-издательский центр ОИНГМСОРАН, 1999. С. 12–17.
10. Ольховатенко В.Е., Чернышова Н.А., Краевский А.А. Геоэкологическая оценка и прогноз осадок грунтовых толщ при длительном водопонижении на оползнеопасной территории Лагерного сада г. Томска. Томск : Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2013. 123 с.
11. Чернышова Н.А. Геоэкологическая оценка и прогноз развития осадок грунтовых толщ при длительном водопонижении на оползнеопасной территории г. Томска : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Томск, 2007. 158 с.
12. Устюгов А.С. Анализ фактических осадок зданий на глинистых грунтах в г. Томске и их сопоставление с предельно допустимыми значениями // Избранные доклады 67-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск, 2021. С. 228–234.
13. Ющин А.И. Особенности проектирования фундаментов зданий на основаниях, деформируемых горными выработками. Москва : Стройиздат, 1980. 135 с.
14. Яровой Ю.И. Прогноз деформаций земной поверхности и защита городской застройки при строительстве метрополитенов на Урале. Пермь : УрГАПС, 1999. 258 с.

REFERENCES

1. Nikolaev A.P. Soil deformation in deep horizontal areas in groundwater lowering areas. In: Coll. Papers 'Hydrogeology and Karst Science'. Perm, 2009. Pp. 224–231. (In Russian)
2. Gal'perin A.M., Semenova E.A. Forecast of geomechanical processes at mining enterprises on the basis of rock mass consolidation theory. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2016; (2): 111–120. (In Russian)
3. Gal'perin A.M., Moseikin V.V., Punevskii S.A., Semenova E.A. Geomechanics and engineering geology in man-made rock mass. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2018; (S1): 5–13. (In Russian)
4. Karpenko N.P., Beglyarova E.S., Sokolova S.A., Matveeva T.I. Filtration calculations of groundwater lowering in engineering communication construction. *Prirodoobustroistvo*. 2021; 1: 126–133. (In Russian)
5. Konoplyantsev A.A., Yartseva E.N. Settlement of the earth's surface due to low groundwater levels. Moscow, 1983. 48 p. (In Russian)

6. Gol'ts S.I. Whether groundwater pumping affects the earth's surface settlement in Moscow and the Moscow region. *Byulleten MOIP*. 1972; 47: 42–51. (In Russian)
7. Nuridzhanyan S.Sh., Sarkisyan V.S., Khachatryan G.T. Forecast of the earth's surface settlement during soil drainage. *Dokl. AN SSSR*. 1987; 6: 1330–1333. (In Russian)
8. Fi Kh.T., Strokova L.A. Typification of soil strata in the city of Hanoi (Vietnam) in studying subsidence of the earth's surface during dewatering. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2017; 4: 6–17. (In Russian)
9. Ol'khovatenko V.E. Geoecological problems of the Tomsk city and measures for engineering protection of the territory. *Obskoi vestnik*, Novosibirsk, 1999. Pp. 12–17. (In Russian)
10. Ol'khovatenko V.E., Chernyshova N.A., Kraevskii A.A. Geoecological assessment and forecast of soil sedimentation during prolonged water drawdown on the landslide territory of Lagerny Garden in Tomsk. Tomsk: TSUAB, 2013. 123 p. (In Russian)
11. Chernyshova N.A. Geoecological assessment and forecast of soil sedimentation during prolonged water drawdown on the landslide territory of Lagerny Garden in Tomsk. PhD Thesis. Tomsk, 2007. 158 p. (In Russian)
12. Ustyugov A.S. Analysis of building settlement on clay soils in Tomsk and its maximum allowable values. In: *Selected Papers 67th University Conf. of Students and Young Scientists*. Tomsk, 2021. Pp. 228–234. (In Russian)
13. Yushchin A.I. Design features of building foundations deformed by mining. Moscow: Stroiizdat, 1980. 135 p. (In Russian)
14. Yarovoi, Yu.I. Forecast of deformations of the earth's surface and protection of urban development during subway construction in the Urals. Perm, 1999. 258 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Ющубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Тарасов Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

Устюгов Артем Сергеевич, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ram10kler6@gmail.com

Authors Details

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sv@tsuab.ru

Aleksandr A. Tarasov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tar.a.a@mail.ru

Artem S. Ustyugov, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ram10kler6@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 14.03.2023
Одобрена после рецензирования 25.03.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 14.03.2023
Approved after review 25.03.2023
Accepted for publication 16.05.2023

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 151–161.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 151–161.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161

EDN: PUDLRT

СТЕКЛОКЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ШПИНЕЛИ $MgAl_2O_4$, ПОЛУЧЕННАЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ ПЛАВКИ

Валентин Валерьевич Шеховцов

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

Аннотация. Актуальность исследования и применения стеклокерамических материалов на основе шпинели ($MgAl_2O_4$) обусловлена такими ее уникальными свойствами, как прочность, термостойкость, высокая теплопроводность. Эти свойства делают шпинель востребованным материалом для создания высокотехнологичных изделий и покрытий.

Цель настоящей работы: исследование возможности синтеза стеклокерамики на основе $MgAl_2O_4$ с содержанием диоксида кремния от 10 до 50 масс. %.

Для получения стеклокерамических образцов использовался метод плазменной плавки компонентных шихт при мощности электродугового плазмотрона 10 кВт и времени плавления 90 с. Полученные образцы исследовались методами РФА, EDX, ИКФС, СЭМ.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований получения стеклокерамики на основе шпинели с содержанием диоксида кремния от 10 до 50 масс. %.

Установлено, что при введении SiO_2 не более 20 масс. % в шихту со стехиометрическим составом шпинели не наблюдается фазовых превращений с образованием бинарных соединений типа $2MgO \cdot SiO_2$, $MgO \cdot SiO_2$, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. С увеличением SiO_2 от 30 до 50 масс. % влияние SiO_2 является существенным, в структурной матрице материала формируется квазиаморфная фаза. При этом в образце с содержанием SiO_2 30 масс. % прослеживаются слабые пики стехиометрической кристаллической фазы $MgAl_2O_4$ при $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$. Образцы с содержанием SiO_2 от 40 до 50 масс. % являются рентгеноаморфными. Для последних установлена тенденция к сужению диффузионного гало за счет доминанции ионов Si^{4+} при формировании решетки. Данное явление также подтверждается результатами ИКФС.

По результатам СЭМ описан процесс растворения кристаллической фазы $MgAl_2O_4$.

Установлено, что при содержании 30–40 масс. % SiO_2 растворение кристаллической фазы шпинели сопровождается образованием локальных областей с обогащением Mg и Al, т. е. происходит дифференциация в конденсированной фазе.

Полученные результаты могут быть интересны для разработки теплозащитных материалов, катализаторов, материалов электронной техники, а также для других отраслей промышленности, где требуется высокотехнологичная керамика.

Ключевые слова: шпинель, диоксид кремния, стеклокерамика, фазовые превращения, морфология

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2023-0003 и гранта Президента МК-66.2022.4.

Для цитирования: Шеховцов В.В. Стеклокерамика на основе шпинели MgAl_2O_4 , полученная методом плазменной плавки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 151–161. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161. EDN: PUDLRT

ORIGINAL ARTICLE

MgAl_2O_4 -BASED GLASS CERAMICS SYNTHESIZED BY THERMAL PLASMA MELTING

Valentin V. Shekhovtsov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The relevance of research and application of glass-ceramic materials based on spinel (MgAl_2O_4) is due to its unique properties such as strength, heat resistance, and high thermal conductivity. These properties make spinel a popular material for creating hi-tech products and coatings.

The paper presents the experimental results of the production spinel-based glass ceramics with the silicon dioxide content 10 to 50 wt.%. Thermal plasma melting is used obtain glass-ceramic samples, at 10 kW power and 90 s melting time. The obtained samples are studied by XRF, EDX, IRFS, SEM methods.

It is shown that the introduction of SiO_2 in the amount of not over 20 wt.% into the mixture with stoichiometric spinel, phase transformations with the formation of binary $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ compounds do not occur. With increasing SiO_2 content from 30 to 50 wt.%, the effect from SiO_2 is significant, a quasi-amorphous phase appears in the material matrix. At the same time, the SiO_2 content of 30 wt.% provides weak intensity of the stoichiometric crystalline phase MgAl_2O_4 at $2\theta = 36.6, 44.7, 59.3, 65.4$ degrees. Samples with the SiO_2 content 40 to 50 wt.% are X-ray amorphous. In this case, the diffusion halo narrows due to the dominance of Si^{4+} during the lattice formation. This phenomenon is also confirmed by IRFS results.

Based on SEM observations, a complete dissolution of the MgAl_2O_4 crystalline phase occurs. When the content of SiO_2 is 30 to 40 wt.%, dissolution of the spinel crystalline phase is accompanied by the formation of local regions rich in Mg and Al, i.e., differentiation proceeds in the condensed phase.

The research results will be of interest for the development of heat-shielding materials, and can be used for the catalyst development, in electronics and other industries producing hi-tech ceramics.

Keywords: spinel, silicon dioxide, glass ceramics, phase transformation, morphology

Funding: this work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FEMN-2023-0003) and Grant N MK-66.2022.4 from the President of the Russian Federation.

For citation: Shekhovtsov V.V. $MgAl_2O_4$ -based glass ceramics synthesized by thermal plasma melting. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 151–161. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161. EDN: PUDLRT

Введение

Стеклокерамика (стеклокристаллические материалы) занимает особое место в производстве объёмных композиционных керамических материалов традиционного класса и в высокотехнологических областях техники [1, 2, 3]. Несмотря на широкое применение стеклокристаллических материалов, производство их до сих пор является сложной научной проблемой. Кристаллизация стеклокристаллических материалов – это неравновесный процесс, который делает производство очень сложным и дорогостоящим. Кроме того, кристаллизованные образцы могут иметь неравномерную структуру, что ухудшает их свойства.

Особым видом стеклокерамики являются оптически прозрачные материалы на основе специальных соединений, таких как шпинель [4, 5, 6]. Такая керамика широко используется в электронике, оптике, медицине и при изучении физико-химических процессов, протекающих в материалах. В последние годы предложено несколько способов создания оптически прозрачной керамики [7, 8, 9]. Шпинель ($MgAl_2O_4$) относится к группе кристаллов, имеющих высокую термическую стабильность, твердость и диэлектрическую прозрачность. Оптически прозрачные керамические материалы на основе $MgAl_2O_4$ могут применяться в качестве заменителя стекла и пластика в различных приложениях.

В современной промышленности использование термической плазмы в процессе плавления имеет большую перспективу в связи с рядом преимуществ этой технологии. Во-первых, термическая плазма позволяет достичь высоких температур (среднемассовая температура 6000 K), что обеспечивает получение расплавов из очень сложных и тугоплавких материалов. Во-вторых, возможно получение высоких скоростей нагрева, что позволяет производить расплавы с определенными свойствами (например, повышенной степенью кристаллизации). В-третьих, термическая плазма является эффективным инструментом для обработки различных материалов и отходов, который обеспечивает экологическую устойчивость технологий производства. Наконец, применение термической плазмы позволяет получать расплавы с определенными химическими и физическими свойствами, что может быть полезно для различных отраслей промышленности, таких как металлургия, химическая, электронная и др.

Целью настоящей работы является исследование возможности синтеза стеклокерамики на основе $MgAl_2O_4$ с содержанием диоксида кремния от 10 до 50 масс. %.

Материалы, эксперимент и методы исследования

В качестве источника оксида магния (MgO), оксида алюминия (Al_2O_3) и диоксида кремния (SiO_2) применялись распространенные природные сырьевые материалы: магнезит, бёмит и кварцевый песок соответственно перечисленным оксидам. В таблице представлен усредненный оксидный состав используемых материалов.

Оксидный состав материалов

Oxide content

Материал	Содержание, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Δm _{прк}
Магнезит	1,60	0,59	0,80	0,85	48,39	0,05	50,26
Бёмит	0,03	99,0	0,02	—	—	—	0,9
Кварцевый песок	98,15	0,67	0,09	0,07	0,02	—	0,94

Стоит отметить, что каждый вид сырья и материалы на их основе, полученные с использованием энергии термической плазмы, ранее исследовались с применением полного комплекса физико-химических методов [10–13]. Например, в работах [10, 11] проведен анализ структурно-фазовых изменений кварцевого песка, магнезита и продуктов плавления на их основе. Согласно [12], источник оксида алюминия (бёмит) неплохо зарекомендовал себя при синтезе муллитов. В работе [13] показана возможность синтеза алюмомагнезиальной шпинели высокой чистоты с применением электродуговой плавки компонентов. Однако влияние SiO₂ на процесс растворения шпинели в бинарной системе MgO-Al₂O₃ не исследовалось, что подтверждается отсутствием научных работ в периодической литературе.

На рис. 1, а представлена часть тройной диаграммы состояния MgO-Al₂O₃-SiO₂, где отмечены приготовленные составы шихт, которым присвоен шифр (SP-1, SP-2 и т. д.). Порядковый номер соответствует количеству вводимого диоксида кремния относительно стехиометрического состава шпинели. Например, индекс 1 соответствует 10 масс. % диоксида кремния в шихте.

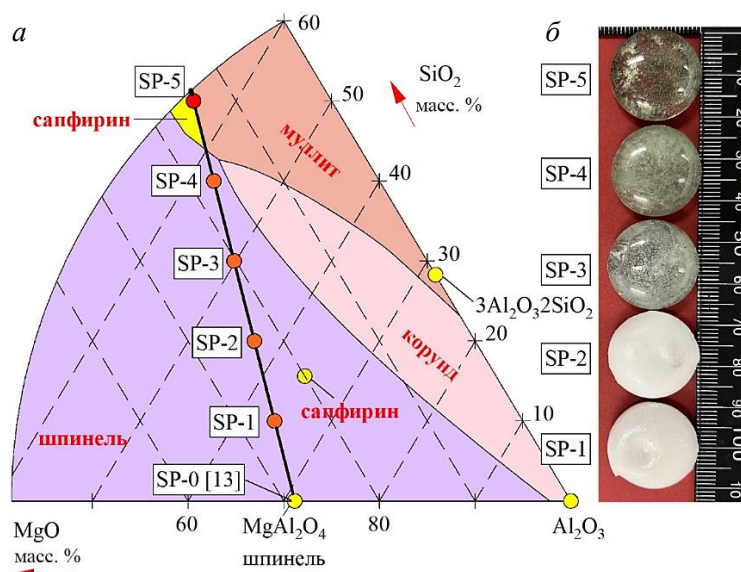


Рис. 1. Участок диаграммы состояния MgO-Al₂O₃-SiO₂ с указанием экспериментальных составов (а); фотография полученных образцов (б)

Fig. 1. Ternary phase diagram of MgO-Al₂O₃-SiO₂ with experimental compositions (а); photograph of synthesized samples (б)

Экспериментальные исследования проводились на электроплазменном стенде [10–13], в основу которого положено использование энергии термической плазмы для плавления твердофазных материалов. Плавление проходило в графитовом тигле высотой 60 мм и диаметром 25 мм. Масса засыпки составляла 10 г. Образцы синтезировались при мощности 12 кВт в течение 90 с. На рис. 1, б показана фотография полученных образцов.

Рентгеноструктурные исследования проведены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000 с использованием медного излучения (K_α), фокусировки по Брэггу – Брентано с шагом 0,02, времени экспозиции в точке 0,5 с и углового диапазона 10–90°. Оценка морфологии синтезируемых образцов выполнена на сканирующем электронно-ионном микроскопе FEI Quanta 200 3D (30 кВ).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа продуктов плавления, полученных из исследуемых составов. Установлено, что в образцах SP-1 и SP-2, где содержание SiO_2 не превышает 20 масс. %, фазовых образований не протекает, бинарные соединения типа $2MgO \cdot SiO_2$, $MgO \cdot SiO_2$, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ не установлены. Это объясняется высокой скоростью кристаллизации $MgAl_2O_4$ в системе $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ ввиду того, что $MgAl_2O_4$ имеет наивысшую точку конгруэнтной температуры плавления 2135 °С.

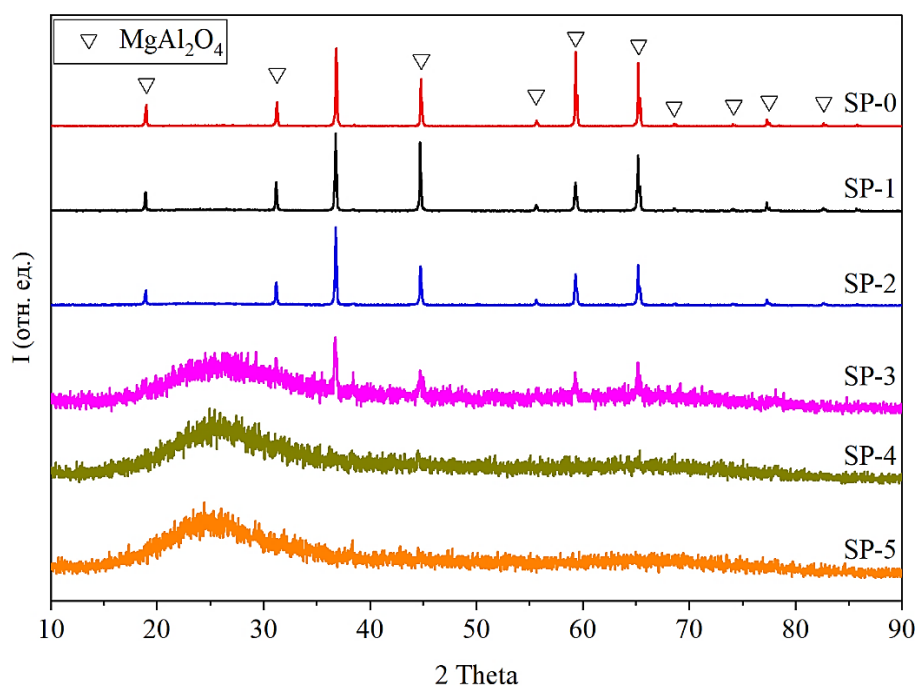


Рис. 2. Экспериментальные дифрактограммы синтезируемых образцов в среде термической плазмы

Fig. 2. XRD patterns of samples synthesized by thermal plasma melting

Когда содержание SiO_2 увеличивается с 30 до 50 масс. %, в структурной матрице материала формируется квазиаморфная фаза. При этом в образце SP-3 прослеживаются слабые интенсивности стехиометрической кристаллической фазы MgAl_2O_4 при $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$. Образцы SP-4 и SP-5 состоят из квазиаморфной фазы, и методом рентгенофазового анализа невозможно определить количество растворенной MgAl_2O_4 в составе синтезируемых образцов. Стоит отметить, что с увеличением содержания SiO_2 диффузионное гало стремится к сужению и показывает доминацию ионов Si^{4+} при формировании решетки.

На рис. 3 представлены результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии синтезируемых образцов.

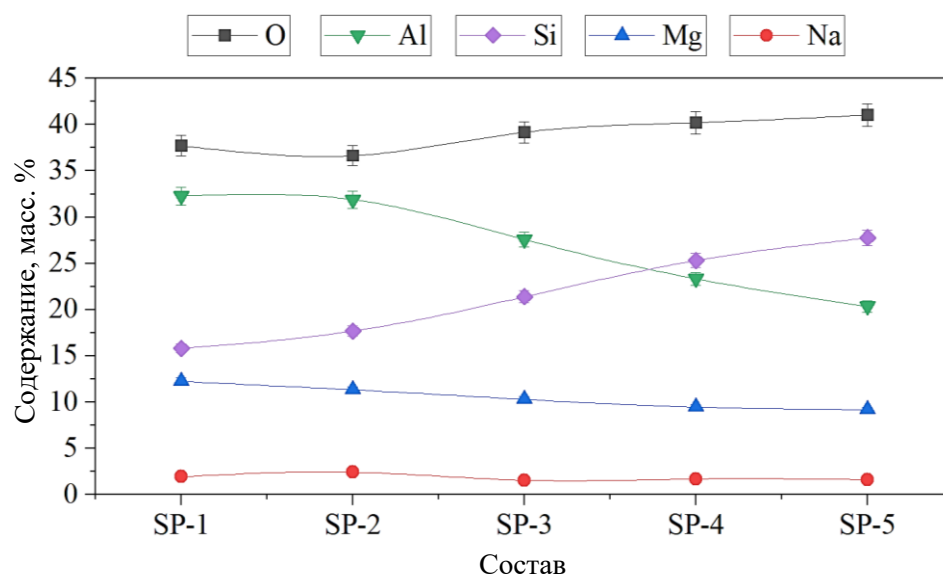


Рис. 3. Результаты энергодисперсионного анализа синтезируемых образцов
Fig. 3. EDX results of synthesized samples

Согласно полученным результатам, в образцах SP-1 и SP-2 состав матрицы имеет линейную тенденцию, отклонение содержания элементов находится на уровне 2 %. В пределах составов образцов SP-3 и SP-4 просматривается переходная область, свидетельствующая о деструкции кристаллической шпинели. Далее влияние ионов Si^{4+} на формирование полной объемной матрицы существенно растет, что согласуется со снижением содержания Al и Mg. Наличие атомов Na обосновано введением в шихту силиката натрия (Na_2SiO_3) в качестве водного раствора. Однако его концентрация не превышает 2 масс. % и не меняется во всем диапазоне рассматриваемых составов. Таким образом, его вклад в формирование структурной матрицы синтезируемых материалов незначителен.

Для того чтобы уточнить взаимосвязь межмолекулярных взаимодействий SiO_2 и MgAl_2O_4 , проведена инфракрасная спектроскопия образцов SP-3, SP-4 и SP-5. Зарегистрированы ИК-Фурье спектры в диапазоне $370\text{--}1500\text{ см}^{-1}$

с помощью спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (приставка «Алмаз на КРС-5», спектрометр Tensor 27), $D = 4 \text{ см}^{-1}$, 128 накоплений, сохранены исходные данные, а также проведена стандартная математическая обработка лучших из полученных спектров, для которых применена атмосферная компенсация CO_2 и H_2O , вычтена базовая линия. Приведенные спектры нормированы для упрощения сравнения полученных данных (рис. 4).

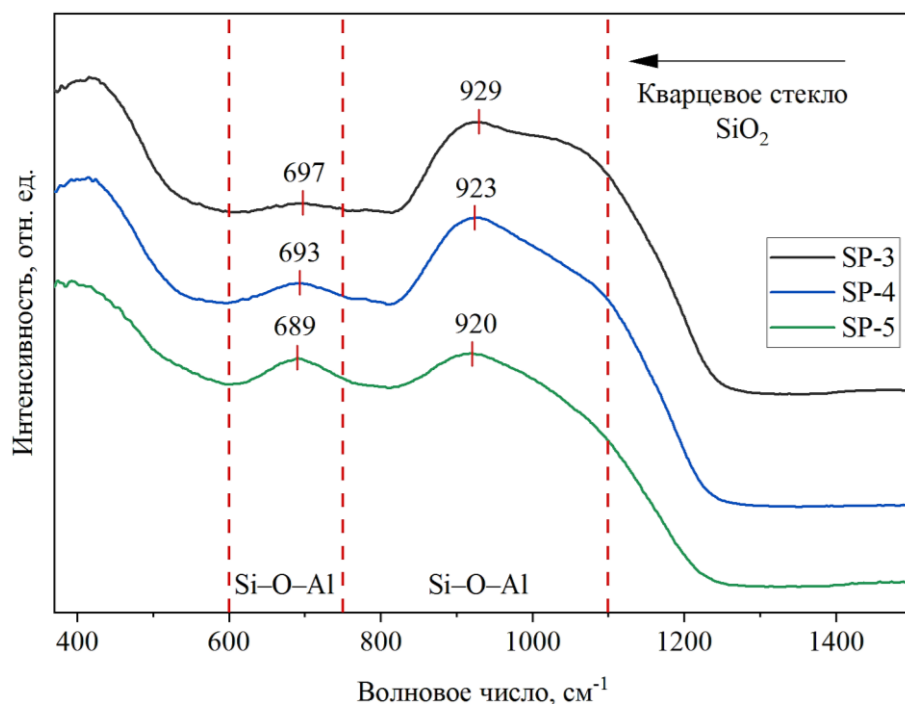


Рис. 4. ИК-спектры синтезируемых образцов
Fig. 4. IR spectra of synthesized samples

Согласно исследованиям, введение SiO_2 в $MgAl_2O_4$ приводит к изменению связей $Si-O-Si$, $Al-O-Al$ и $Si-O-Al$. При добавлении SiO_2 в $MgAl_2O_4$ происходит образование новых связей между атомами Si и Al , что ведет к появлению дополнительных кислородных связей в кристаллической структуре материала. Однако при высокой концентрации SiO_2 возникают проблемы со стабильностью кристаллической структуры, что согласуется с результатами РФА (см. рис. 2). Излишняя концентрация Si в шпинели приводит к изолированию SiO_4 тетраэдров. Отсутствие ярко выраженных валентных полос, связанных с $Si-O-Si$, обусловлено увеличением среднего расстояния между $(Si, Al)-O$ и упорядочением каркасной сетки через ее аморфизацию.

На рис. 5 представлены электронные снимки скола поверхности синтезируемых продуктов в среде термической плазмы. Первоначальный анализ снимков указывает на наличие двух видов разрушения: при содержании $SiO_2 \geq 20$ масс. % разрушение интеркристаллитное; при содержании $30 \leq SiO_2 \leq 50$ масс. % – транскристаллитное.

С точки зрения формирования морфологических признаков объемной матрицы в образце SP-1, как и положено, формируются октаэдрические кристаллы размером от 10 до 60 мкм [13]. В некоторых областях между границами разделов кристаллов наблюдается однородная связка (гомогенная по структурному признаку), но данные области отличаются от состава стехиометрической шпинели (присутствуют следы SiO_2). Однако её вклад в формирование всей матрицы материала минимален, в большей степени присутствует плотная упаковка октаэдрических кристаллов MgAl_2O_4 .

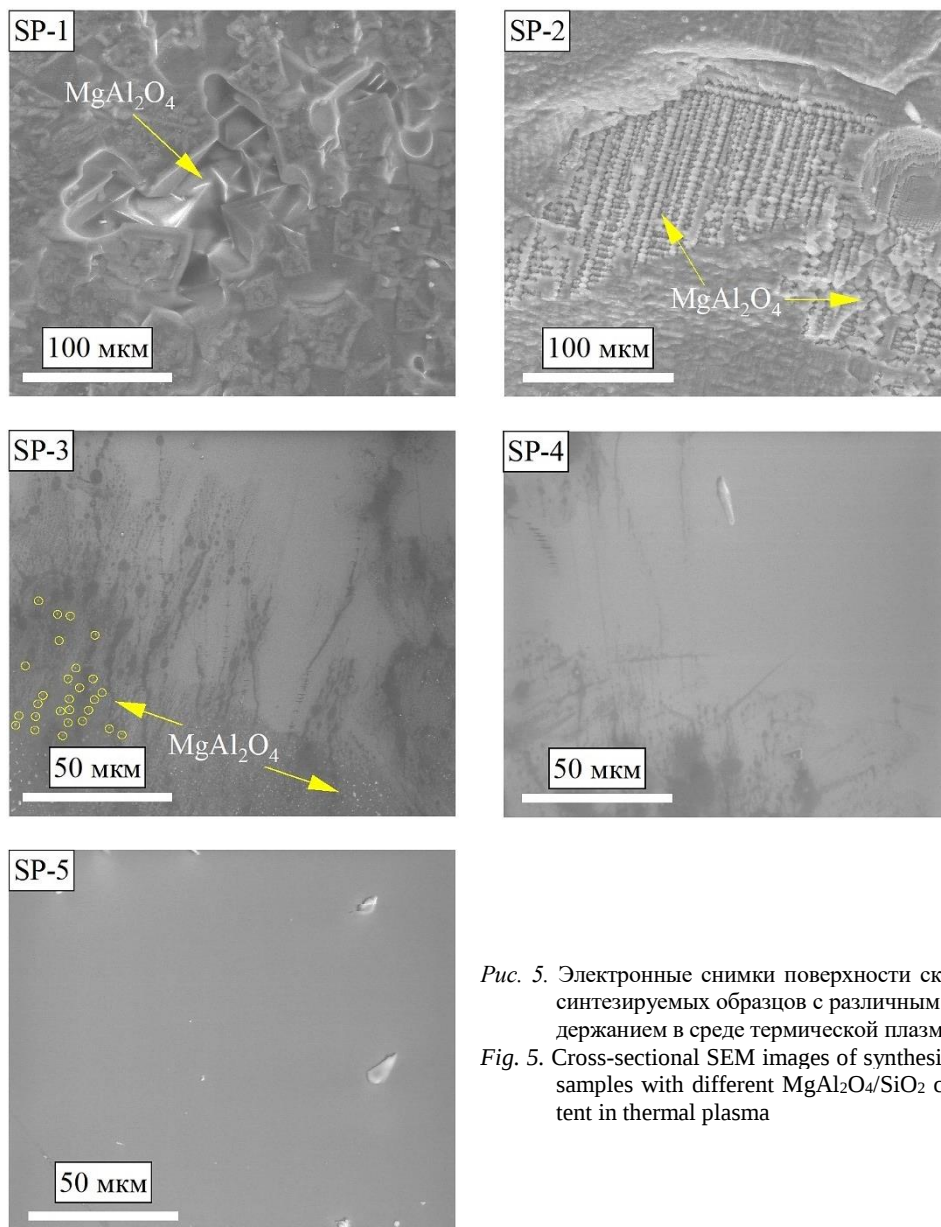


Рис. 5. Электронные снимки поверхности скола синтезируемых образцов с различным содержанием в среде термической плазмы
Fig. 5. Cross-sectional SEM images of synthesized samples with different $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ content in thermal plasma

В образце SP-2 наблюдается уменьшение размеров октаэдрических кристаллов $MgAl_2O_4$ вплоть до микронных и субмикронных благодаря поверхностному диффузионному перемешиванию атомов шпинели при контакте с локальными областями жидкой фазы, представленной SiO_2 . Это находит своё подтверждение с постепенным увеличением содержания SiO_2 в образце SP-3, т. к. в нем просматриваются субмикронные включения кристаллической фазы $MgAl_2O_4$ (отмечены желтыми областями на рис. 5), что согласуется и с результатами рентгенофазового анализа (см. рис. 2). Стоит отметить, что содержание SiO_2 в пределах 30–40 масс. % обеспечивает растворение кристаллической фазы шпинели, которое сопровождается образованием локальных областей с обогащением Mg и Al, т. е. дифференциация протекает в конденсированной фазе. Разделение по структурному фактору в матрице образца SP-5 не прослеживается. Это достигается полным растворением кристаллов шпинели, что ведет к образованию единого материала без наглядного присутствия кристаллических фаз, т. е. кристаллы шпинели разрушаются, и ионы Mg^{2+} и Al^{3+} внедряются в сформированную квазиаморфную матрицу, замещая ионы Si^{4+} . Кроме того, атомы кислорода из шпинели могут переходить в стекло (аморфное состояние, при котором структура материала не имеет дальнего порядка) и образовывать дополнительные связи аморфных силикатов.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность использования энергии термической плазмы для синтеза стеклокерамики на основе шпинели $MgAl_2O_4$ с содержанием диоксида кремния до 50 масс. %. Установлена зависимость влияния концентрации диоксида кремния на структуру и фазовый состав стеклокерамического материала на основе кристаллической фазы шпинели. С увеличением SiO_2 от 30 до 50 масс. % его влияние растёт, формируется квазиаморфная фаза в структурной матрице материала. При этом в образце с содержанием 30 масс. % SiO_2 прослеживаются слабые интенсивности стехиометрической кристаллической фазы $MgAl_2O_4$ при $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$. Образцы с содержанием от 40 до 50 масс. % SiO_2 являются рентгеноаморфными. Для рентгеноаморфных образцов установлена тенденция сужения диффузионного гало за счет доминанции ионов Si^{4+} при формировании решетки. Данное явление также подтверждается результатами инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье.

Таким образом, исследование, представленное в статье, подтверждает перспективность использования метода плазменной плавки для получения новых стеклокерамических материалов на основе шпинели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вандрай С.Н., Зайчук Т.В., Устинова Ю.С. и др. Кордиеритовая стеклокерамика для изделий радиотехнического назначения // Стекло и керамика. 2019. № 9. С. 17–23.
2. Лесников А.К., Лесников П.А., Тюрина З.Г. Стеклокерамика на основе диоксида кремния, как перспективный материал для использования в атомной энергетике // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48, № 4. С. 428–450.
3. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щеголева Н.Е. и др. Радиопрозрачная стеклокерамика на основе стронцийалюмосиликатного стекла // Огнеупоры и техническая керамика. 2016. № 6. С. 31–37.

4. Колобкова Е.В., Полякова А.В., Абдршин А.Н. и др. Наноструктурированная стеклокерамика на основе фторофосфатных стекол с квантовыми точками PbSe // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41. № 1. С. 173–177.
5. Dan Han, Jian Zhang, Peng Liu, Gui Li, Liqiong An, Shiwei Wang. Preparation of high-quality transparent Al-rich spinel ceramics by reactive sintering // Ceram. Int. 2018. № 44 (3). P. 3189–3194. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.089>
6. Waetzig K., Krell A. The effect of composition on the optical properties and hardness of transparent Al-rich MgO·nAl₂O₃ spinel ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2016. № 99 (3). P. 946–953.
7. Khomidov F.G., Kadyrova Z.R., Usmanov K.L. et al. Peculiarities of sol-gel synthesis of aluminum-magnesium spinel // Glass Ceram. 2021. № 78. P. 251–254.
8. Vojtěch Nečina, Willi Pabst. Comparison of the effect of different alkali halides on the preparation of transparent MgAl₂O₄ spinel ceramics via spark plasma sintering (SPS) // J. Eur. Ceram. Soc. 2020. № 40 (15). P. 6043–6052.
9. Pappas J.M., Thakur A.R., Kinzel E.C., Dong X. Direct 3D printing of transparent magnesium aluminate spinel ceramics // J. Laser Appl. 2020. № 33 (1). P. 012018.
10. Abzaev Y.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K. et al. Investigation of the melting of quartz sand by low-temperature plasma // Glass Ceram. 2015. № 72 (5–6) P. 225–227.
11. Шеховцов В.В., Абзаев Ю.А., Волокитин О.Г. и др. Особенности структурно-фазового состояния природного магнезита MgCO₃ в диапазоне температур 1173–6500 К // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 7 (776). С. 73–78.
12. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Гафаров Р.Е. Синтез муллитсодержащей керамики в среде низкотемпературной плазмы // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48. № 5. С. 630–634.
13. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Улмасов А.Б. Синтез алюмомагнезимальной керамики MgAl₂O₃ в среде термической плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 138–146.

REFERENCES

1. Vandrai S.N., Zaichuk T.V., Ustinova Yu.S., et al. Cordierite glass ceramics for radiotechnical products. *Steklo i keramika*. 2019; (9): 17–23. (In Russian)
2. Lesnikov A.K., Lesnikov, P.A. Tyurnina Z.G. Glass ceramics based on silicon dioxide as a promising material for nuclear power industry. *Fizika i khimiya stekla*. 2022; 48 (4): 428–450. (In Russian)
3. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Shchegoleva N.E., et al. Radio-transparent glass-ceramic based on strontium-alumino-silicate glass. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2016; (6): 31–37. (In Russian)
4. Kolobkova E.V., Polyakova A.V., Abdrshin A.N., et al. Nanostructured glass ceramics based on fluorophosphate glasses with PbSe quantum dots. *Fizika i khimiya stekla*. 2015; 41 (1): 173–177. (In Russian)
5. Dan Han, Jian Zhang, Peng Liu, Gui Li, Liqiong An, Shiwei Wang. Preparation of high-quality transparent Al-rich spinel ceramics by reactive sintering. *Ceramics International*. 2018; 44 (3): 3189–3194. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.089>
6. Waetzig K., Krell A. The effect of composition on the optical properties and hardness of transparent Al-rich MgO·nAl₂O₃ spinel ceramics. *American Ceramics Society*. 2016; 99 (3): 946–953.
7. Khomidov F.G., Kadyrova Z.R., Usmanov K.L., et al. Sol-gel synthesis of aluminum-magnesium spinel. *Glass Ceramics*. 2021; 78: 251–254. (In Russian)
8. Vojtěch Nečina, Willi Pabst. Comparison of the effect of different alkali halides on the preparation of transparent MgAl₂O₄ spinel ceramics via spark plasma sintering (SPS). *Journal of the European Ceramic Society*. 2020; 40 (15): 6043–6052.
9. Pappas J.M., Thakur A.R., Kinzel E.C., Dong X. Direct 3D printing of transparent magnesium aluminate spinel ceramics. *Journal of Laser Applications*. 2020; 33 (1): 012018.
10. Abzaev Y.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., et al. Investigation of the melting of quartz sand by low-temperature plasma. *Glass and Ceramics*. 2015; 72 (5–6): 225–227.
11. Shekhovtsov V.V., Abzaev Yu.A., Volokitin O.G., et al. Structure and phase composition of natural magnesite in 1173–6500 K temperature range. *Russian Physics Journal*. 2022; 65 (7): 1142–1148.

12. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Gafarov R.E. Synthesis of mullite-containing ceramics in a low-temperature plasma. *Glass Physics and Chemistry*. 2022; 48 (5): 440–443.
13. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Ulmasov A.B. Synthesis of aluminum-magnesian ceramics $MgAl_2O_3$ in thermal plasma environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (3): 138–146. (In Russian)

Сведения об авторе

Шеховцов Валентин Валерьевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Author Details

Valentin V. Shekhovtsov, PhD, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2 Building 2, 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2023
Одобрена после рецензирования 05.06.2023
Принята к публикации 06.06.2023

Submitted for publication 22.05.2023
Approved after review 05.06.2023
Accepted for publication 06.06.2023

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 162–168.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 162–168.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 628.1/332.621

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-162-168

EDN: QVBNEW

КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ КАК ФАКТОР ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДОЛЖЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Олег Александрович Продоус¹, Дмитрий Иванович Шлычков²

¹ООО «ИНКО-эксперт», г. Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация. В процессе эксплуатации гидравлические характеристики трубопроводов изменяются ввиду определенных причин, в частности за счет наличия слоя отложений. Важным параметром оценки эксплуатации трубопроводов является коэффициент эффективности.

Цель исследования: доказательство необходимости использования при гидравлических расчетах сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями значений расчетного коэффициента эффективности эксплуатации сетей для возможности прогнозирования значений гидравлических характеристик труб с любой (измеренной) толщиной слоя отложений.

Материалы и методы. Используются расчетные зависимости, многократно опубликованные авторами в печати.

Результаты. Для оценки возможности прогнозирования значений характеристик гидравлического потенциала труб с отложениями предложено использовать при гидрав-

лических расчетах труб значения коэффициента эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения.

Разработана форма расчетных таблиц для составления справочного пособия «Таблицы для гидравлического расчета сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб».

Ключевые слова: сети водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями, гидравлический расчет труб, зависимость гидравлических характеристик труб от толщины слоя осадка, внутренние отложения, коэффициент эффективности эксплуатации сети

Для цитирования: Продоус О.А., Шлычков Д.И. Коэффициент эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения как фактор оценки возможности продолжения дальнейшей их эксплуатации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 162–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-162-168. EDN: QVBNEW

ORIGINAL ARTICLE

EFFICIENCY COEFFICIENT OF WATER SUPPLY AND REMOVAL AS AN ASSESSMENT FACTOR OF FURTHER OPERATION

Oleg A. Prodous¹, Dmitrii I. Shlychkov²

¹ ООО "INCO-expert", Saint-Petersburg, Russia

² The National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Abstract. During operation, pipeline hydraulic characteristics change due to the presence of sedimentary layers in pipes. The efficiency coefficient is an important parameter for the evaluation of the pipeline operation.

Purpose: The aim of this work is to prove the necessity of using the efficiency coefficient in the hydraulic analysis of water supply and removal with internal sedimentary layers in pipes in order to predict their hydraulic characteristics with any (measured) thickness of the sedimentary layer.

Methodology: Dependences used herein are repeatedly published by the authors.

Research findings: Calculation tables are developed to design the reference manual "Calculation tables for hydraulic analysis of water removal in pipes with sedimentary layers".

Practical implication: The proposed values of the efficiency coefficient of water supply and removal can be used in hydraulic calculations to predict the hydraulic potential of pipes with sedimentary layers.

Keywords: water supply, water removal, sedimentary layer, hydraulic analysis, efficiency coefficient

For citation: Prodous O.A., Shlychkov D.I. Efficiency coefficient of water supply and removal as an assessment factor of further operation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 162–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-162-168. EDN: QVBNEW

Введение

В процессе жизненного цикла трубопроводов водоснабжения и водоотведения из любого вида материалов на этапе эксплуатации наблюдается изме-

нение значений характеристик гидравлического потенциала труб: $d_{\text{вн}}$, V , i за счет наличия слоя внутренних отложений [1]. Основными причинами изменения значений указанных характеристик являются:

- качественный состав транспортируемой воды, зависящий от вида источника водоснабжения (поверхностный или подземный);
- продолжительность периода эксплуатации трубопровода (возраст);
- гидравлический режим эксплуатации труб;
- наличие слоя отложений (осадка) на внутренней поверхности труб;
- местные сопротивления (тройники, отводы, клапаны и др.).

Принято считать, что эффективными с гидравлической точки зрения являются напорные трубопроводы, имеющие минимальные фактические потери напора на сопротивление по длине $i_{\text{ф}}$ [1] и, соответственно, минимальные энергозатраты насосного оборудования, перекачивающего питьевую воду потребителям $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}$ [2]; для самотечных сетей водоотведения – трубопроводы, работающие при нормативно установленной степени наполнения труб конкретного диаметра $\frac{H}{d_{\text{вн}}}$ с рекомендованными минимальными скоростями $V_{\text{мин}}$ [3].

Приведенные выше причины изменения значений характеристик гидравлического потенциала труб способствуют также образованию слоя отложений на внутренней поверхности водопроводных труб или слоя отложений (осадка) в лотковой части труб водоотведения [4, 5]. Каким критерием следует оценивать изменение значений гидравлических характеристик труб?

Методы

Оптимальным критерием, по мнению авторов статьи, является коэффициент гидравлической эффективности эксплуатации трубопроводов водоснабжения или водоотведения $K_{\text{эф}}$, определяемый по формуле

$$K_{\text{эф}} = \frac{\left(d_{\text{вн}}^{\text{ф}}\right)^2 V_{\text{ф}} \cdot i_{\text{ф}}}{\left(d_{\text{вн}}^{\text{н}}\right)^2 V \cdot i}, \quad (1)$$

где $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$, $V_{\text{ф}}$, $i_{\text{ф}}$ – значения фактических характеристик гидравлического потенциала труб, подвергаемых оценке; $d_{\text{вн}}^{\text{н}}$, V , i – значения тех же характеристик для новых труб; $K_{\text{эф}}$ – это безразмерный коэффициент, являющийся отношением произведения значений характеристик гидравлического потенциала труб, бывших в эксплуатации (изношенных), к произведению тех же характеристик для новых труб. Принято считать, что диапазон изменения значений $K_{\text{эф}}$ – от 1 до 0:

$$0 \leq K_{\text{эф}} \leq 1.$$

Чем больше величина значения $K_{\text{эф}}$, тем меньше по величине изменения в процессе эксплуатации имеют характеристики гидравлического потенциала труб, и наоборот.

Результаты

Исследование значений $K_{эф}$ для труб разного диаметра и различных видов материалов позволило авторам разработать специальные таблицы для водопроводных труб с отложениями (табл. 1) и самотечных сетей с осадком в их лотковой части (табл. 2). По этим таблицам производится оценка периода их остаточной эксплуатации до проведения реконструкций (замены) трубопровода или гидродинамической очистки труб от слоя отложений [6, 7].

Таблица 1

Диапазон изменения значений $K_{эф}$ для труб сетей водоснабжения

Table 1

Efficiency coefficient values for pipes with sedimentary layers

Значение величины $K_{эф}$	Продолжительность периода остаточной эксплуатации трубопровода из стали и серого чугуна $T_{исп}$, лет
$0,95 \leq K_{эф} \leq 1$	$T_{исп} \geq 10$ лет с ежегодным контролем значений фактических потерь напора $i_{ф}$ и толщины фактического слоя отложений $\sigma_{ф}$
$0,90 \leq K_{эф} \leq 0,95$	$T_{исп} \geq$ не менее 5 лет с ежегодным контролем значений $i_{ф}$ и $\sigma_{ф}$
$0,8 \leq K_{эф} \leq 0,90$	Трубопровод эксплуатировать нецелесообразно
$K_{эф} < 0,80$	Трубопровод эксплуатировать недопустимо

Таблица 2

Диапазон изменения значений $K_{эф}$ для труб сетей водоотведения

Table 2

Efficiency coefficient values for water removal pipes

Значение величины $K_{эф}$	Возможность продолжения дальнейшей эксплуатации сети
$0,6 \leq K_{эф} \leq 1$	Возможно
$0,5 \leq K_{эф} \leq 0,6$	Требуется проведение гидродинамической очистки сети
$K_{эф} \leq 0,5$	Сеть эксплуатировать недопустимо

Настоящий подход при оценке возможности продолжения дальнейшей эксплуатации трубопроводов реализуем только при известных параметрах величины значений $K_{эф}$, легко вычисляемых по известным, опубликованным ранее в печати формулам [8].

Представленные в табл. 1 и 2 значения $K_{эф}$ обладают большой практической значимостью, т. к. позволяют эксплуатирующим сети водоснабжения и водоотведения организациям планировать (прогнозировать) эксплуатационные расходы, обоснованно проводить реконструкцию сетей или замену труб, а также планировать своевременное проведение их гидродинамической очистки.

Таким образом, значения коэффициента эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения необходимо учитывать при проведении гидравлических расчетов труб для прогнозирования периода их дальнейшей остаточной эксплуатации. Такой подход является гидравлически обоснованным, поскольку учитывает состояние сетей (толщину слоя отложений) на момент проведения их оценки.

Вышеприведенные результаты являются основанием для рекомендации включения $K_{эф}$ в разрабатываемое в настоящее время авторами справочное пособие «Таблицы для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб».

Ниже приводится форма таких расчетных таблиц, в которых используется значение $K_{эф}$, обеспечивающее возможность прогнозирования значений характеристик гидравлического потенциала сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб (табл. 3).

Таблица 3

**Форма таблиц для гидравлического расчета сетей водоотведения
из любого вида материала труб**

Table 3

Calculation table for hydraulic analysis of water removal pipes

Толщина слоя отложе- ний h , м	Рас- ход q , м ³ /с	Приве- денный диа- метр труб $d_{пр}$, м	Приве- денная ско- рость V , м/с	Коэф- фициент А. Шези C	Приве- денный гидрав- лический уклон $i_{пр}$, м/м	Фактическая степень наполнения труб $\frac{H_{ф}}{d_{пр}}$ **	$K_{эф}$ *

* Безразмерный коэффициент гидравлической эффективности эксплуатации сети водоотведения определяется по формуле (1).

** $H_{ф} = H_n + h$, м, где H_n – нормативный уровень наполнения, м, рассчитывается по СП 32.13330.2018, h – толщина слоя отложений, м, измеряется или задается.

Представленная форма расчетных таблиц (табл. 3) отличается от своих аналогов тем, что в нее добавлено значение толщины слоя осадка в лотковой части труб h и приведено значение коэффициента эффективности эксплуатации сети $K_{эф}$. Это является ее существенной особенностью. Отличие и преимущество данной формы таблиц заключается в том, что при проектировании или эксплуатации по известному (измеренному) значению толщины слоя отложений в трубах h можно рассчитать значения фактических гидравлических характеристик труб: $d_{вн}^{\phi}$, V_{ϕ} и i_{ϕ} с конкретным слоем отложений в их лотковой части h и прогнозировать период остаточной продолжительности эксплуатации сетей (см. табл. 1 и 2) до проведения их реконструкции или замены труб на новые [9, 10, 11].

Приведенная в настоящей статье информация является продолжением серии публикаций авторов по теме «Оценка эффективности эксплуатации инженерных сетей – новое научное направление в сфере водоснабжения и водоотведения» [12].

Выводы

Использование расчетного коэффициента эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения расширяет диапазон данных о трубопроводах и обеспечивает:

– возможность проведения анализа значений гидравлических характеристик труб с разной толщиной слоя внутренних отложений;

- возможность прогнозирования периода остаточной эксплуатации трубопроводов с разной толщиной слоя отложений (осадка);
- условия для обоснования необходимости разработки проектов реконструкции (замены) трубопроводов водоснабжения и водоотведения на новые;
- обоснование необходимости проведения гидродинамической очистки трубопроводов от слоя отложений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Продоус О.А., Шлычков Д.И., Пархоменко С.В.* Необходимость разработки таблиц для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Вестник ВолГАСУ. 2022. Вып. 2 (87). С. 107–114.
2. *Дикаревский В.С., Продоус О.А., Якубчик П.П., Смирнов Ю.А.* Резервы экономии электроэнергии при транспортировании воды по водоводам из железобетонных труб // Рациональное использование воды и топливно-энергетических ресурсов в коммунальном водном хозяйстве : тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара (Алма-Ата, 6–8 августа 1985 г.). Москва : КСМ ВСНТО, 1985. С. 90–92.
3. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85. Издание официальное. Москва, 2019. 76 с.
4. *Продоус О.А.* Технический аудит состояния городского водопровода и канализации для оценки их возможностей на перспективу // Трубопроводы и экология. 2011 № 2. С. 14.
5. *Продоус О.А., Шлычков Д.И., Якубчик П.П., Пархоменко С.В.* Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 738–746. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746
6. *Продоус О.А., Новиков М.Г., Самбурский Г.А., Шитлов А.А., Терехов Л.Д., Якубчик П.П., Чесноков В.А.* Рекомендации по реконструкции неновых металлических трубопроводов водоснабжения из стали и серого чугуна. Санкт-Петербург ; Москва : ООО «Свое издательство», 2021. 36 с.
7. *Продоус О.А., Шлычков Д.И., Абросимова И.А.* Обоснование необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 106–114. DOI 10.22227/1997-0935.2022.1 URL: <http://vestnikmgsu.ru/component/sjarchive>
8. *Продоус О.А., Шлычков Д.И.* Об опыте модернизации систем водоснабжения и водоотведения в ЖКХ и промышленности : материалы VII конференции, 29.09. – 03.10.2022. Пятигорск. URL: <https://pump.ru/conference/arkhiv/>
9. *Федоров Н.Ф., Волков Л.Е.* Гидравлический расчет канализационных сетей (Расчетные таблицы). 4-е изд., испр. Ленинград : Стройиздат, 1968. 252 с.
10. *Лукиных А.А., Лукиных Н.А.* Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского. 4-е изд., доп. Москва : Стройиздат, 1974. 160 с.
11. *Патент № 207822.* Устройство для измерения толщины отложений в трубе / Продоус О.А., Шлычков Д.И. Зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей РФ 18.11.2021 г.
12. *Продоус О.А., Шлычков Д.И.* Прогнозирование возможности продолжения эксплуатации самотечных сетей водоотведения с отложениями с лотковой части труб // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4 (39). С. 646–653.

REFERENCES

1. *Prodous O.A., Shlychikov D.I., Parkhomenko S.V.* Development of calculation tables for the hydraulic analysis of gravity flow sewerage networks with sedimentation in the flume pipe. *Vestnik VolgGASU*. 2022; 2 (87): 107–114. (In Russian)
2. *Dikarevsky V.S., Prodous O.A., Yakubchik P.P., Smirnov Yu.A.* Reserves of energy saving during water transportation through pipelines made of reinforced concrete pipes. In: *All-Union Sci. Seminar "Rational Use of Water, Fuel and Energy Resources in Municipal Water Management"*, Alma-Ata, 1985. Pp. 90–92. (In Russian)

3. SP 32.13330.2018 Sewerage. Outdoor networks and structures. Moscow, 2019. 76 p. (In Russian)
4. Prodous O.A. Technical audit of urban water supply and sewerage to assess their future capabilities. *Truboprovody i ekologiya*. 2011; (2); 14. (In Russian)
5. Prodous O.A., Shlychkov D.I., Yakubchik P.P., Parkhomenko S.V. Influence of sedimentary layer thickness in water supply system on their operation. *Vestnik MGSU*. 2022; 17 (6): 738–746. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746 (In Russian)
6. Prodous O.A., Novikov M.G., Sambursky G.A., Shipilov A.A., Terekhov L.D., Yakubchik P.P., Chesnokov V.A. Recommendations for reconstruction of non-standard metal water supply pipelines made of steel and gray cast iron. Saint-Petersburg; Moscow, 2021. 36 p. (In Russian)
7. Prodous O.A., Shlychkov D.I., Abrosimova I.A. Hydrodynamic cleaning of gravity drainage networks. *Vestnik MGSU*. 2022; 17 (1): 106–114. DOI 10.22227/1997-0935.2022.1 <http://vestnikmgsu.ru/ru/component/sjarchive> (In Russian)
8. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Experience in updating water and wastewater systems in housing and industry. In: *Proc. 7th Conf.*, 2022, Pyatigorsk. Available: <https://pump.ru/conference/arkhiv/> (In Russian)
9. Fedorov N.F., Volkov L.E. Hydraulic calculation of sewer networks (Calculation tables), 4th ed. Leningrad: Stroyizdat, 1968. 252 p. (In Russian)
10. Lukinykh A.A., Lukinykh N.A. Tables for hydraulic analysis of sewer networks according to the Pavlovsky formula, 4th ed., Moscow: Stroyizdat, 1974. 160 p. (In Russian)
11. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Device for measuring sedimentary layer thickness in pipes. UMP Rus. Fed. No. 207822, 2021. (In Russian)
12. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Forecasting continuous operation of gravity drainage networks with sedimentary layers in pipe tray. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2021; 11 (4 (39)): 646–653. (In Russian)

Сведения об авторах

Продоус Олег Александрович, докт. техн. наук, профессор, независимый эксперт, ООО «ИНКО-эксперт», 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 37/1, лит. А, пом. 1-Н, pro@enco.su

Шлычков Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, ShlyichkovDI@mgsu.ru

Authors Details

Oleg A. Prodous, DSc, Professor, independent expert in water supply and removal, ООО "INCO-expert", 37/1, Moskovskii Ave., 190005, Saint-Petersburg, Russia, pro@enco.su

Dmitrii I. Shlyichkov, PhD, A/Professor, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, ShlyichkovDI@mgsu.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 17.01.2023
Одобрена после рецензирования 20.03.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 17.01.2023
Approved after review 20.03.2023
Accepted for publication 16.05.2023

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 169–184.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 169–184.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7.8, 624.132, 624.138

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-169-184

EDN: HHGLGA

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСРЕДОТОЧЕННОГО ВНЕСЕНИЯ ОСУШАЮЩИХ АГЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

Евгений Николаевич Алькаев, Александр Александрович Лунёв
*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,
г. Омск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* В современной практике строительства все больше внимания уделяется качеству сооружения земляного полотна автомобильных дорог. При этом в большинстве регионов Российской Федерации существует дефицит природных строительных материалов требуемого качества. В связи с этим актуальность приобретают методы стабилизации природных глинистых грунтов для доведения их свойств до требований нормативной документации.

Цель работы заключается в исследовании влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта.

Задачами исследования являются: изучение влияния введения химических добавок на механические показатели глинистого грунта, а также влияния перерыва между смешением и уплотнением смеси.

Материалы и методы. Предлагаемый метод сосредоточенного внесения осушающих агентов (известки, активной золы-уноса и их комбинаций, в т. ч. с добавками), помимо осушающей функции, может потенциально улучшать механические свойства глинистых грунтов, т. е. выполнять функцию укрепления грунта. Для проверки этой гипотезы были проведены исследования по определению предела прочности на сжатие образцов глинистого грунта (суглинка легкого пылеватого), обработанного гидратированной известью в количестве 2, 4 и 6 % по массе, гидратированной высококальциевой золой-уносом

в количестве 4, 8 и 12 % по массе, а также комбинацией гашеной извести и химических добавок-ускорителей (CaCl_2 , FeSO_4 , NaOH в количестве 0,5 и 1,0 % от массы сухого грунта). Для учета влияния перерыва между перемешиванием смеси и уплотнением также были проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Результаты и выводы. Установлено, что повышение прочности глинистого грунта после внесения извести отмечается даже при малых дозировках, причем она существенно превосходит (на 194 %) эффект от внесения золы-уноса. Добавки CaCl_2 и NaOH существенно ускоряют набор прочности образцов, а внесение FeSO_4 улучшает кинетику набора прочности на первом этапе (до 7 суток) и в дальнейшем вызывает полное разрушение структуры материала. Исследование по изучению влияния перерывов до уплотнения также показало существенное снижение прочности при разрыве во времени между внесением агентов и уплотнением.

Ключевые слова: строительство, автомобильные дороги, стабилизация грунтов, глинистые грунты, известь, зола-унос, добавки-ускорители

Для цитирования: Алькаев Е.Н., Лунёв А.А. Исследование влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 169–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-169-184. EDN: HHGLGA

ORIGINAL ARTICLE

CONCENTRATED EFFECT OF DRYING AGENTS ON MECHANICAL PERFORMANCE OF CLAY SOIL

Evgeny N. Alkaev, Aleksandr A. Lunev

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Abstract. In modern construction, more and more attention is paid to the roadbed quality. At the same time, in most regions of the Russian Federation there is a shortage of natural building materials of the required quality. In this regard, methods of stabilizing natural clay soils should be developed to satisfy the regulatory documentation.

Purpose: The chemical additive effect on mechanical properties of clay soil.

Methodology: The proposed method of concentrated effect of drying agents (lime, active fly ash) can potentially improve the mechanical performance of clay soils, i.e., strengthen the soil. Compressive strength testing of clay soil (light powdery loam) includes its treatment in hydrated lime in the amount of 2, 4 and 6 wt.%, hydrated high-calcium fly ash in the amount of 4, 8 and 12 wt.%, and a combination of slaked lime and chemical additives-accelerators (CaCl_2 , FeSO_4 , NaOH) in the amount of 0.5 and 1.0 % of the dry soil mass.

Research findings: Even small amounts of lime improve the clay soil strength, which exceeds the effect from the fly ash introduction by 194 %. CaCl_2 and NaOH additives significantly accelerate the strength gain. The introduction of FeSO_4 improves the strength gain kinetics at the first stage (up to 7 days) and further causes a complete destruction of the material structure. The compaction also shows a significant decrease in the tensile strength during the time between the dry agent introduction and compaction.

Keywords: construction, highway, soil stabilization, clay soil, lime, fly ash, accelerators

For citation: Alkaev E.N., Lunev A.A. Concentrated effect of drying agents on mechanical performance of clay soil. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 169–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-169-184. EDN: HHGLGA

Введение

В настоящее время в Российской Федерации значительно увеличились объёмы дорожного строительства в связи с действием национального проекта «Безопасные качественные дороги». Увеличение объемов работ вызывает дефицит инертных материалов и способствует вовлечению в строительный процесс местных грунтов. При этом влажность этих грунтов не всегда соответствует показателям, регламентируемым строительными нормами.

Глинистые грунты, влажность которых превышает требуемую, не поддаются необходимому уплотнению механическими средствами, имеют повышенную липкость, низкие деформационные и прочностные характеристики, подвержены морозному пучению. Следовательно, возведение земляного полотна из таких грунтов возможно только после их технической мелиорации (стабилизации).

Профессором В.В. Сиротюком выделяются три группы методов улучшения строительных свойств грунтов с повышенной влажностью: механические, физические и химические¹.

Наиболее распространен на практике метод консолидации грунтов, т. е. постепенное уплотнение за счет нагрузки от вышележащих слоев грунта насыпи [1]. При этом консолидация земляного полотна из грунтов с повышенной влажностью, рассчитанного на естественную консолидацию, может продолжаться от 1 до 3 лет (в песчаных грунтах) и от 4 до 8 лет (в глинистых грунтах). Ускорение консолидации возможно при устройстве вертикальных и горизонтальных слоёв из дренирующих материалов [2, 3, 4].

При механических методах технической мелиорации грунтов с повышенной влажностью возникают проблемы с налипанием грунта на рабочие органы техники и затрудняется проходимость техники вследствие низкой несущей способности грунта. Таким образом, уменьшается производительность техники и экономическая эффективность [5].

При воздействии температурным полем в общем случае просыхание грунтов происходит путем физического испарения воды с поверхности. При этом процесс сушки грунта зависит от погодных-климатических факторов, таких как температура, скорость и повторяемость ветра, количество осадков, что является недостатком данного метода [5].

Одним из нетрадиционных, но перспективных способов технической мелиорации грунтов является применение эффекта электроосмоса [6, 7, 8], основанного на воздействии на грунт электромагнитного поля. Этот способ заключается в пропускании через влажный грунт постоянного электрического тока, который подается в массив путем погружения в него металлических электродов. При этом полярные молекулы воды устремляются к отрицательно заряженному перфорированному электроду-катоде, из которого вода удаляется. Однако использование этого метода требует специалистов высокой квалификации, сложного оборудования и высокой культуры производства работ.

¹ Сиротюк В.В. Сооружение земляного полотна из грунтов с влажностью выше оптимальной. Омск: СибАДИ, 2018. 174 с.

Введение активных химических добавок в грунт с влажностью выше допустимой предполагает их физико-химическое взаимодействие. При этом, как правило, грунт не только осушается, но и укрепляется, т. е. приобретает более высокие и устойчивые механические свойства [9]. Возможно комплексное воздействие, например, введение химических реагентов с помощью электромагнитного поля [10, 11, 12].

В качестве стабилизаторов глинистых грунтов широко используют портландцемент и известь. Особое распространение данные добавки получили в европейских странах, поскольку дефицит строительных материалов вынуждает применять стабилизаторы для улучшения физико-механических свойств глинистых грунтов [13, 14, 15]. Помимо цемента и извести, рекомендуются другие добавки, такие как зола-унос, доменный шлак, зола инсенерации ТБО, фосфогипс, красный шлам (отход производства глинозема методом Байера), карбонат кальция, хлорид кальция, лигносульфонат и другие, которые также повышают физико-механические показатели грунтов [15, 16, 17, 18].

Введение химических добавок в глинистый грунт с повышенной влажностью подразумевает только улучшение физико-механических показателей. Предлагаемый авторами настоящей статьи метод сосредоточенного воздействия осушающего агента главным образом направлен на осушение грунта в карьере. Сосредоточенное воздействие – это устройство прорезей определенных размеров и заполнение их осушающим агентом. В отличие от методов, подразумевающих применение других активных добавок, грунт осушается в карьере, и на этапе разработки влажность грунта находится в допустимых пределах. С этой точки зрения наиболее подходящими добавками являются негашёная известь и высококальциевые золы-уносы, которые наряду с уменьшением влажности грунта улучшают его физико-механические свойства [19, 20, 21, 22, 23].

Эффект осушения достигается за счет того, что происходит гашение извести водой, содержащейся в массиве грунта. В результате гашения происходит образование гидроксида кальция, который является медленнотвердеющим вяжущим материалом, способствующим в результате протекания таких реакций, как катионный обмен, флокуляция/агломерация, карбонизация и пуццолановая реакция. Поэтому частичное смешивание глинистого грунта повышенной влажности с известью в процессе разработки будет способствовать снижению пластичности, увеличению оптимальной влажности, уменьшению максимальной плотности [24] и пучения, увеличению сопротивляемости циклам высушивания/увлажнения [25] и несущей способности [26, 27, 28, 29, 30].

Поскольку известь является медленнотвердеющим вяжущим, а технологические перерывы в производстве работ увеличивают сроки строительства и сдачи завершённого объекта в эксплуатацию, в данной работе исследовались различные добавки для ускорения твердения [16, 17]. В качестве ускорителей рассматривали такие добавки, как сернокислое железо, каустическая сода, хлорид кальция.

Цель работы – исследование влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта. Задачами исследования являются изучение влияния введения химических добавок на

механические показатели глинистого грунта, а также влияния перерыва между смешением и уплотнением смеси.

Материалы и методы

Глинистый грунт. В качестве исследуемого грунта был использован суглинок легкий пылеватый из карьера на базе ООО «Сибирский Железобетон» в г. Омске. Свойства грунта приведены в табл. 1. После отбора проб грунт высушивался до постоянной массы при температуре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ и измельчался на грунтовой мельнице МГ-1Ф до размеров гранул менее 1 мм.

Таблица 1

Физико-механические свойства грунта

Table 1

Physical and mechanical properties of soil

Наименование показателя	Фактические данные	Ед. изм.
1. Влажность на границе текучести	31,38	%
2. Влажность на границе раскатывания	19,46	%
3. Число пластичности	0,12	—
4. Оптимальная влажность	17,8	%
5. Максимальная плотность скелета грунта	1,77	г/см ³
6. Плотность частиц грунта	2,60	г/см ³
7. Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм)	4,1	%
8. Ph водной вытяжки	9,15	—
9. Емкость катионного обмена	7,8	МГ _{экв} /100 г
10. Потери при прокаливании	3,54	%

Известь. Использовалась гидратная известь (пушонка) производства ООО «ОМИКС». Перед проведением исследований известь высушивалась в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ и измельчалась до размеров менее 0,5 мм. На момент испытания содержание CaO+MgO составляло 3–4 % от общей массы извести.

Зола-унос. Используемая в исследовании зола-унос была отобрана с электрофильтров Новосибирской ТЭЦ-3. Отбор проб велся в герметичную тару для сохранения естественной влажности. Химический состав приведен в табл. 2. По химическому составу зола является высококальциевой, низкосульфатной (относится к классу С по ASTM C618).

Добавки. Все добавки (CaCl_2 , FeSO_4 , NaOH) поставлялись ООО «Омскреактив» в порошкообразном виде. Добавки при необходимости измельчались до размеров менее 0,1 мм, для анализа использовался семиводный сульфат железа (чистый), остальные добавки (хлорид кальция (чистый для анализа) и гидроксид натрия (чистый для анализа)) безводные, поэтому для сульфата железа вводилась поправка на 7 молекул воды, чтобы концентрация чистого FeSO_4 соответствовала 0,5 % от массы сухого грунта.

Таблица 2

Химический состав золы-уноса

Table 2

Chemical composition of fly ash

ТЭЦ, источник топлива	Содержание окислов, % (в перерасчете на сухое вещество)									
	SiO ₂	R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃	CaO _{св}	п.п.п
Новосибирская ТЭЦ-3, Назаровский разрез	23,2–41,7	16,7–32,90	6,4–13,0	10,3–19,9	24,2–44,6	4,5–5,2	0,4–2,2	0,8–4,5	2,3–13,2	0,2–3,5

Вода. Для испытаний использовалась водопроводная питьевая вода. Водородный показатель (рН) – 7,7, содержание растворимых солей – 65 мг/дм³, в том числе ионы SO₄ – 28,4 мг/дм³, хлориды – 15 мг/дм³.

План эксперимента

Изучение влияния извести. Для суглинка легкого пылеватого без добавления и с добавлением 2, 4 и 6 % извести при помощи прибора стандартного уплотнения были определены значения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения максимальной плотности и оптимальной влажности

Table 3

Maximum density and best moisture of lime

Наименования показателя	Суглинок легкий пылеватый с добавлением извести в количестве			
	0	2 %	4 %	6 %
Оптимальная влажность, %	17,8	21,5	22,0	21,9
Максимальная плотность сухого грунта, г/см ³	1,77	1,63	1,57	1,58

Для изготовления образцов грунт перемешивался с гашеной известью в количестве 2, 4 и 6 % по массе сухого грунта. Перемешивание велось вручную до однородного распределения вяжущего по объему грунта. После этого смесь перемешивалась с водой (в количестве, необходимом для достижения оптимальной влажности) и хранилась в герметичном контейнере для равномерного распределения влаги по объему смеси в течение 30 мин.

Образцы формовали путем трамбования навески в малом приборе стандартного уплотнения (ПСУ), форма предварительно смазывалась техническим вазелином, грунт засыпался в один слой и уплотнялся 20 ударами груза мас-

сой 2,5 кг, падающего с высоты 30 см. После извлечения из ПСУ образцы помещались в камеру, обеспечивающую условия нормального твердения (при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, влажности $(95 \pm 5)\%$ и атмосферном давлении), и хранились в течение 3, 7, 28 и 90 сут. Для испытания каждой смеси в определённом возрасте изготавливалось по 3 образца. Так же приготавливались контрольные образцы из суглинка без добавления извести в количестве 3 шт.

После хранения определялся предел прочности на сжатие образцов в проектном возрасте с использованием универсальной испытательной машины ИР 5082-100 при скорости перемещения поршня рабочего цилиндра $(3,0 \pm 0,3)$ мм/мин. Перед испытаниями образцы водонасыщали через слой капиллярно-увлажненного песка в течение трех суток.

Изучение влияния золы-уноса. Аналогично методике, описанной выше, были определены значения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта для данного грунта с добавлением 4, 8 и 12 % золы-уноса. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты определения максимальной плотности
и оптимальной влажности**

Table 4

Maximum density and best moisture of fly ash

Наименования показателя	Суглинок легкий пылеватый с добавлением золы-уноса в количестве			
	0	4 %	8 %	12 %
Оптимальная влажность, %	17,8	17,0	16,1	15,9
Максимальная плотность сухого грунта, г/см ³	1,77	1,79	1,82	1,85

Подготовленный грунт перемешивался с золой-уносом в количестве 4, 8 и 12 % по массе сухого грунта, хранился, формовался (при оптимальной влажности в соответствии с данными табл. 3) и испытывался аналогично методике, описанной выше.

Изучение комбинации извести и добавок-ускорителей. По методике, аналогичной приведенной выше, испытывались образцы с добавлением CaCl_2 , FeSO_4 , NaOH в количестве, равном 0,5 % от массы сухого грунта, для ускорения процесса твердения для CaCl_2 было выполнено дополнительное исследование с содержанием 1,0 %. Добавки вводились в грунт в порошкообразном виде на этапе перемешивания грунта и извести.

Влияние перерыва между перемешиванием и уплотнением смеси. Учет возможности хранения разработанного грунта потребовал проведения дополнительного исследования влияния времени хранения смеси на кинетику твердения грунтов, укрепленных гашеной известью. Для этого готовая перемешанная смесь грунта и извести хранилась в герметичном контейнере, для предотвращения потерь влаги, в течение 1, 3 и 10 сут. Затем были изготовлены образцы (по 6 образцов для каждой смеси), которые также испытывались по описанной выше методике и после приготовления хранились в условиях нормального твердения 28 и 90 сут.

Результаты и выводы

По данным, полученным в результате испытаний по определению предела прочности на сжатие грунта после обработки известью (рис. 1, а), можно сделать вывод, что введение извести увеличивает предел прочности на сжатие изученного суглинка до значений 0,9–1,4 МПа. В возрасте 28 сут образцы продолжают набирать прочность. Это подтверждает, что известь является медленноотвердеющим вяжущим [16, 17] и требуется дополнительное исследование использования добавок для ускорения набора прочности. Следует особо отметить, что даже минимальная дозировка извести 2 % дает увеличение предела прочности на сжатие в 9 раз после 90 сут твердения.

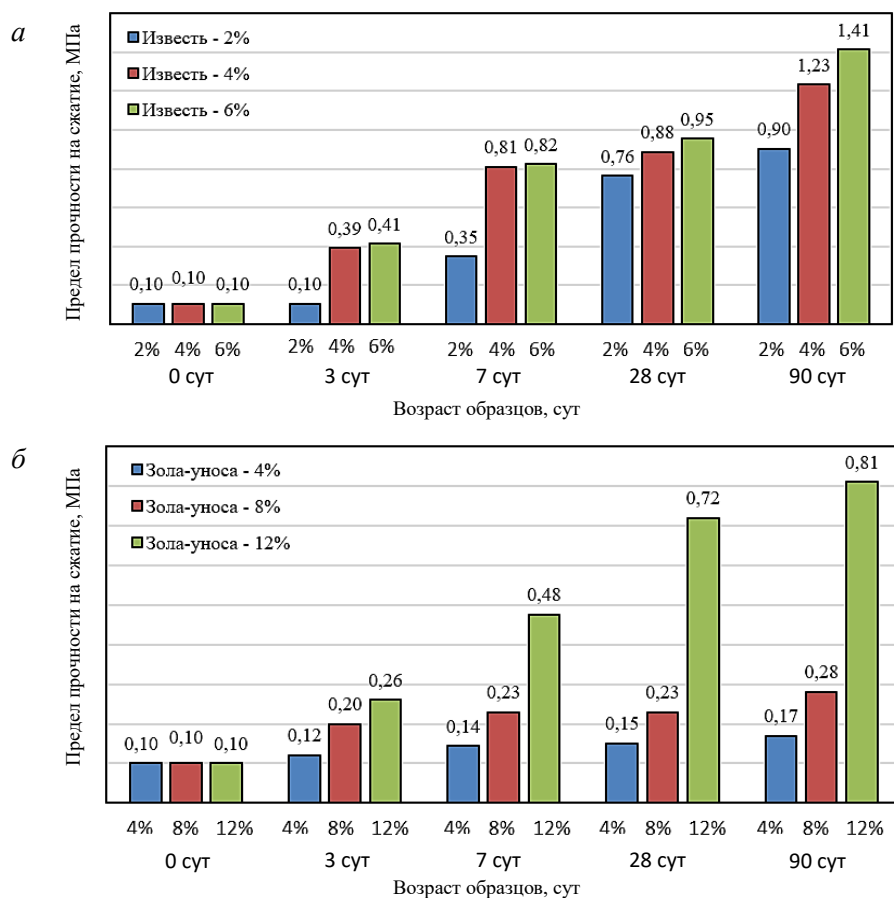


Рис. 1. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании вяжущего в различном возрасте:
а – извести; б – золы-уноса

Fig. 1. Compressive strength of light dusty loam at different binder content and age:
а – lime; б – fly ash

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие грунта после воздействия золы-уноса (рис. 1, б) позволяют сделать вывод, что

введение золы-уноса увеличивает предел прочности на сжатие грунта меньше, чем введение извести (в 1,7–3,5 раза, если делать выводы по образцам в возрасте 90 сут). В возрасте 28 сут образцы продолжают набирать прочность. Это подтверждает, что зола-унос также является медленноотвердеющим вяжущим и её использование требует внесения добавок для ускорения набора прочности. Введение 4 и 8 % золы-уноса дает незначительный положительный эффект повышения предела прочности при сжатии, что в основном связано с низким содержанием оксида кальция, особенно его свободной формы.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие грунта при добавлении различного содержания извести и хлористого кальция (рис. 2) показывают, что добавление хлорида кальция способствует ускорению набора прочности.

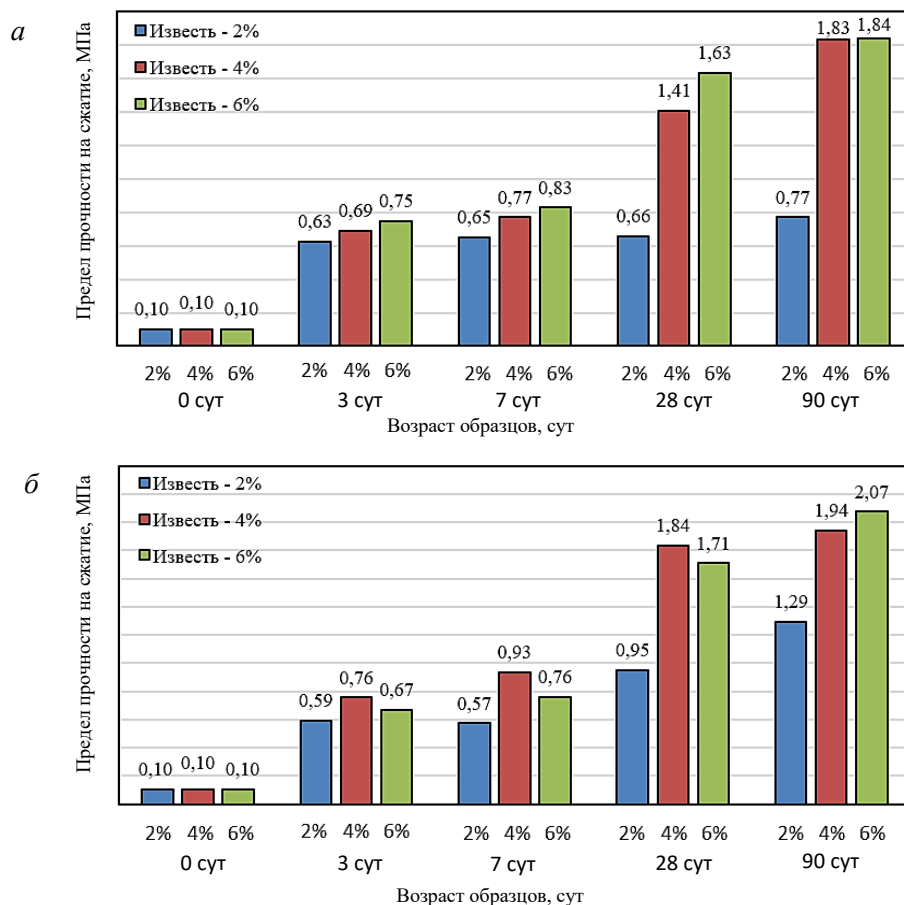


Рис. 2. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и добавлении хлористого кальция в различном возрасте:

а – содержание хлористого кальция 0,5 %; б – содержание хлористого кальция 1,0 %

Fig. 2. Compressive strength of light dusty loam with different content of hydrated lime and calcium chloride at different age:

а – 0.5 % calcium chloride; б – 1.0 % calcium chloride

При этом добавка CaCl_2 в количестве 0,5 % является достаточной для значительного увеличения предела прочности на сжатие. Особенно хорошо это видно на образцах, содержащих 4 % извести, в возрасте 28 и 90 сут. Данный эффект может быть вызван ускорением схватывания на начальных этапах твердения, после чего часть связей была разрушена в процессе перемешивания и уплотнения. Кроме того, можно сделать вывод, что для данного грунта при применении CaCl_2 оптимальная добавка извести соответствует приблизительно 4 %, т. к. предел прочности данных образцов близок к пределу прочности образцов с содержанием 6 % извести.

Результаты опытов с добавлением FeSO_4 и NaOH при укреплении грунтов различным содержанием извести в различном возрасте образцов (рис. 3) показывают, что добавление FeSO_4 негативно влияет на процесс набора прочности образцов грунта, укрепленных известью.

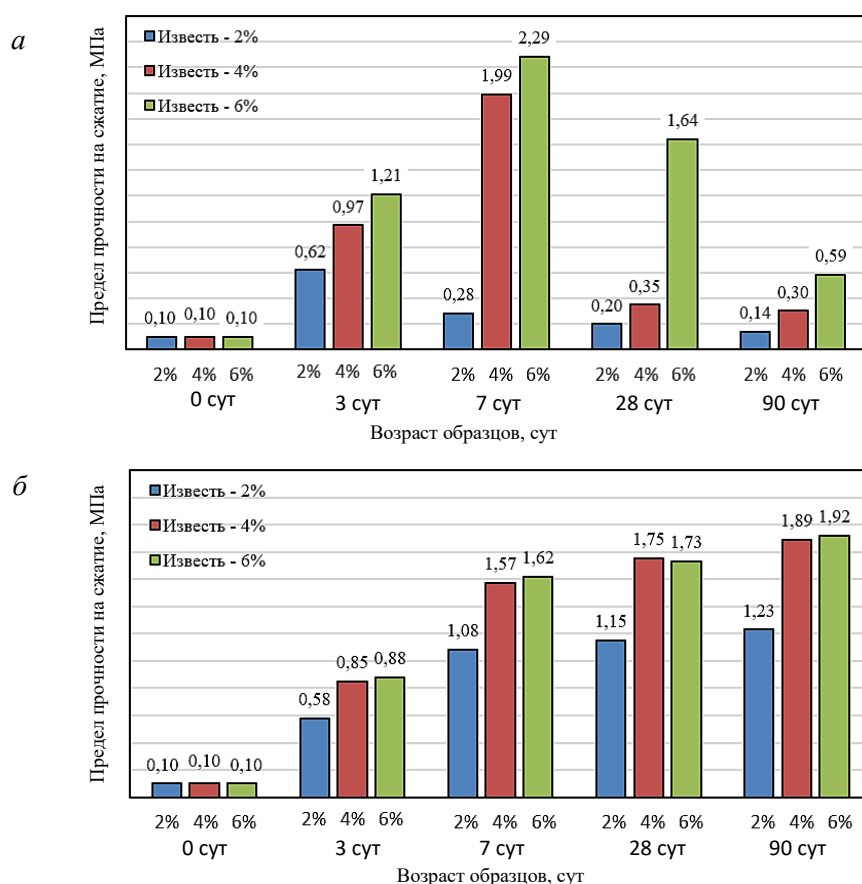


Рис. 3. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и 0,5 % добавок в различном возрасте:

а – сернокислого железа; б – гидроксида натрия

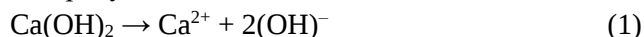
Fig. 3. Compressive strength of light powdery loam with different content of hydrated lime and 0.5 % of additives at different age:

а – ferrous sulfate; б – sodium hydroxide

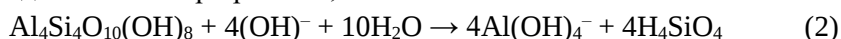
Учитывая, что в процессе хранения образцов на них отмечались локальные разрушения, вызванные увеличением объема образцов, можно сделать вывод, что сульфат-ионы способствуют образованию минерала этtringита (гидросульфаталюминат кальция) [31].

Реакции, происходящие в глинистом грунте при добавлении извести и сульфата железа, приведены ниже.

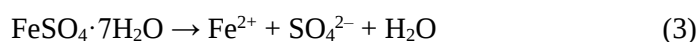
Распад извести на ионы; pH увеличивается до 12,3:



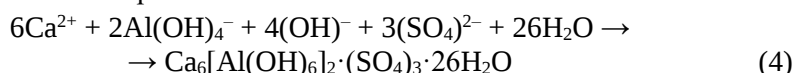
Распад каолинита при pH > 10,5:



Распад сульфата железа:



Формирование этtringита:



Данный минерал содержит большое количество кристаллизованной воды, увеличивающей его размеры приблизительно в 2,5 раза. В результате этой реакции этtringит разрывает образовавшиеся структурные связи, что, вероятно, является причиной потери образцами прочности в ходе проведения опыта.

В отличие от FeSO_4 , внесенного с осушающим агентом (известью), добавление NaOH дает положительные результаты в отношении кинетики набора прочности образцов. По результатам испытаний видно, что процесс набора прочности практически закончился на седьмые сутки, при этом предел прочности на сжатие образцов более чем в 2 раза превысил прочность при введении других добавок.

По полученным результатам можно сделать вывод, что применение CaCl_2 и NaOH в качестве добавок к грунтам, укрепленным известью, положительно влияет на динамику твердения данных образцов. Но для каждой конкретной добавки для достижения максимального эффекта необходимо определение оптимального соотношения компонентов смеси, что требует дальнейших исследований по изучению их влияния на водо- и морозостойкость изучаемых материалов.

Влияние перерыва между смешением и уплотнением смеси. Результаты опытов по оценке снижения прочности укрепленного грунта в зависимости от времени между увлажнением извести и его уплотнением в различном возрасте образцов (рис. 4) позволяют сделать вывод о снижении предела прочности на сжатие при увеличении сроков выдерживания смеси перед уплотнением. За десять суток выдержки перед уплотнением укрепленный грунт потерял порядка 50 % своей прочности.

В ходе анализа полученных данных (рис. 4) была установлена зависимость, которая позволяет прогнозировать предел прочности на сжатие при определенных начальных условиях. Эмпирические соотношения, связывающие эти величины, представлены в виде формулы

$$R_t = R(1 - 0,18 \ln(t)), \quad (5)$$

где R_t – предел прочности на сжатие образца материала при формовке после выдержки в течение t сут, МПа; R – предел прочности на сжатие образца материала при формовке непосредственно после увлажнения, МПа; t – количество суток, прошедших с момента увлажнения извести.

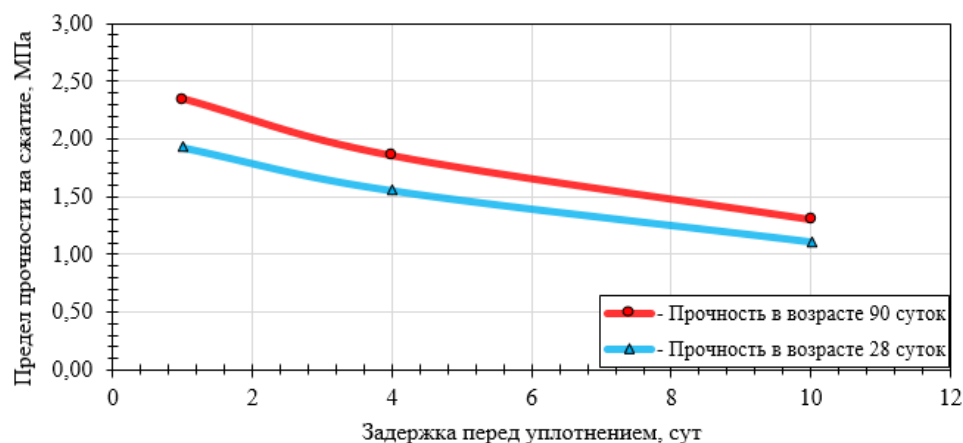


Рис. 4. Изменение прочности на сжатие при различном времени при уплотнении

Fig. 4. Compressive strength at different time before compaction

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы о свойствах грунтов, подвергшихся сосредоточенному воздействию извести:

- обработка известью грунтов увеличивает предел прочности на сжатие, а следовательно, повышает несущую способность слоя, что улучшает качество получаемого из такого грунта основания;

- введение золы-уноса увеличивает предел прочности на сжатие грунта меньше, чем известь (в 1,7–3,5 раза для образцов в возрасте 90 сут), при этом введение 4 и 8 % золы-уноса дает незначительный положительный эффект, что в основном связано с низким содержанием оксида кальция, особенно его свободной формы;

- добавки хлористого кальция и гидроксида натрия (в количестве 0,5 %) ускоряют скорость твердения образцов, причем внесение хлористого кальция ускоряет набор прочности менее интенсивно;

- при увеличении интервала времени между перемешиванием смеси (грунт с добавлением извести) с водой и уплотнением данной смеси от 20 мин до 10 сут было отмечено снижение прочности получаемого материала на величину порядка 50 % от максимальной. Это связано с протеканием в материале пуццолановых реакций – образованием кристаллических связей, которые разрушаются при уплотнении смеси после выдерживания;

- необходимо провести оценку водостойкости и морозостойкости образцов с содержанием 2, 4 и 6 % гидратированной извести в комплексе с до-

бавками хлористого кальция и гидроксида натрия. Кроме того, целесообразно изучить изменение индекса непосредственной несущей способности (ИПН), калифорнийского числа (СБР) и коэффициента фильтрации после сосредоточенного воздействия извести на глинистый грунт.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Yi Dong, Ning Lu, Patrick J. Fox*. Drying-Induced Consolidation in Soil // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020. № 146 (9). P. 1–14. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002327
2. *Jebali H., Prikha W., Bouassida M.* Assessment of Carillo's Theory for Improved Tunis Soft Soil by Geodrains // *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013. P. 2509–2512.
3. *Manish V. Shah, Arvind V. Shroff*. Soil-Structure Interaction of Soft Clay Using Prefabricated Vertical Geodrains Under Seismic Stresses // *Missouri University of Science and Technology*. 2010. № 5.53a. P. 1–8.
4. *Sven Hansbo*. Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains // *Swedish geotechnical institute proceedings*. 1960. № 18. P. 1–166.
5. *Leelamania D.A.L.* Changes in Soil Water Content with Ambient Relative Humidity in Relation to the Organic Matter and Clay // *Tropical Agricultural Research and Extension*. 2010. № 13. P. 6–10. DOI: 10.4038/tare.v13i1.3130
6. *Lucas Martina, Vahid Alizadehb, Jay Meegodaa*. Electro-osmosis treatment techniques and their effect on dewatering of soils, sediments, and sludge: A review // *Soils and Foundations*. 2019. № 59. P. 407–418. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.12.015
7. *Estabragh A.R., Naseh M., Javad A.A.* Improvement of clay soil by electro-osmosis technique // *Electrochimica Acta*. 2015. № 95. P. 32–36. DOI: 10.1016/j.electacta.2014.03.019
8. *Jayasekera S.* Electrokinetics to Modify Strength Characteristics of Soft Clayey Soils: A Laboratory Based Investigation // *Applied Clay Science*. 2015. V. 181. № 6. P. 39–47.
9. *Ali Akbar Firoozi, C. Guney Olgun, Ali Asghar Firoozi, Mojtaba Shojaei Baghini*. Fundamentals of soil stabilization // *International Journal of Geo-Engineering*. 2017. № 26. P. 1–16. DOI: 10.1186/s40703-017-0064-9
10. *Chang-Yu Ou, Shao-Chi Chien, Yi-Guang Wang*. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions // *Applied Clay Science*. 2009. № 44. P. 130–136. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000819
11. *Abdullah W.S., Al-Abadi A.M.* Cationic – electrokinetic improvement of an expansive soil // *Applied Clay Science*. 2010. № 47. P. 343–350. DOI: 10.1016/j.clay.2009.11.046
12. *Amir Hossein Vakili, Mohammad Kaedi, Mehdi Mokhberi, Mohamad Razip bin Selamat, Mahdi Salim*. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application // *Applied Clay Science*. 2018. № 152. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.clay.2017.11.039
13. *Prusinski J., Bhattacharja S.* Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils // *Transportation Research Record*. 1999. № 1652. P. 215–227. DOI: 10.3141/1652-28
14. *Ramdane Bahar, Mouloud Benazzoug, Said Kenai*. Durability of earth stabilized material // *Key Engineering Materials*. 2014. № 600. P. 495–503. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.600.495
15. *Young-sang Kim, Thien Quoc Tran, Gyeong-o Kang, Tan Manh Do*. Stabilization of a residual granitic soil using various new green binders // *Construction and Building Materials*. 2019. № 223. P. 724–735. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.019
16. *John E. Sani, Roland Kufre Etim, Alexander Joseph*. Compaction Behaviour of Lateritic Soil–Calcium Chloride Mixtures // *Geotech Geol Eng*. 2018. P. 1–20. DOI: 10.1007/s10706-018-00760-6
17. *Ramana Murthy V., Hari Krishna P.* Amelioration of Expansive Clay Slopes Using Calcium Chloride // *Journal of materials in civil engineering*. 2007. P. 19–25. DOI: 10.1680/JMCE.2006.10.1.39
18. *Bahram Ta'negonbadi, Reza Noorzad*. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate // *Transportation Geotechnics*. 2017. P. 1–38. DOI: 10.1016/j.trgeo.2017.08.004

19. Слободчикова Н.А. Научные основы подбора состава грунтов, укрепленных известью // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. № 4. С. 1–7.
20. Little D.N. Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall. Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995. 219 p.
21. Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly. The Effects of Various Lime Products for Soil Drying // Technical Report Carmeuse Lime Company. 2007. P. 1–10.
22. Emmanuel Sunday Ajayi. Improv Effect of Lime Variation on the Moisture Content and Dry Density of Lateritic Soil in Ilorin, Nigeria // Int. J. Forest, Soil and Erosion. 2012. №. 2 (4). P. 159–162.
23. Noor S.T., Uddin R. Effect of Lime Stabilization on the Alteration of Engineering Properties of Cohesive Soil // Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. P. 1257–1267. DOI: 10.1007/978-981-10-8016-6_88
24. Mamatha K.H., Dinesh S.V. Resilient modulus of black cotton soil // International Journal of Pavement Research and Technology. 2017. P. 1–41. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.01.008
25. Mavroulidou M., Zhang X., Michael J. Gunn, Cabarkapa Z. Water Retention and Compressibility of a Lime-Treated, High Plasticity Clay // Geotech Geol Eng. 2013. P. 1171–1185. DOI: 10.1007/s10706-013-9642-6
26. Khattab S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.-M. Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil // Journal of materials in civil engineering. 2007. P. 358–366. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:4(358)
27. Bhaskar C.S. Chittoori, Anand J. Puppala, Aravind Pedarla. Addressing Clay Mineralogy Effects on Performance of Chemically Stabilized Expansive Soils Subjected to Seasonal Wetting and Drying // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2018. P. 1–25. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001796
28. López-Laraa T., Hernández-Zaragoza J.B., Horta-Rangel J., Rojas-González E., López-Ayalab S., Castañob V.M. Expansion reduction of clayey soils through Surcharge application and Lime Treatment // Case Studies in Construction Materials. 2017. №. 7. P. 102–109. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.06.003
29. Guillaume Stoltz, Olivier Cuisinier, Farimah Masrouri. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles // Engineering Geology. 2014. №. 181. P. 281–289. DOI: 10.1016/J. ENGGEOL.2014.08.013
30. Asmaa Al-Taie, Disfani M., Evans R., Arulrajah A. Collapse and Swell of Lime Stabilized Expansive Clays in Void Ratio–Moisture Ratio–Net Stress Space // Int. J. Geomech. 2019. № 19. P. 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001488
31. Pat Harris, Tom Scullion, Stephen Sebesta. Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing soils in texas // Technical Report Documentation Page. 2004. № FHWA/TX-04/0-4240-2. P. 46.

REFERENCES

1. Yi Dong, Ning Lu, Patrick J. Fox. Drying-induced consolidation in soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020; 146 (9): 1–14. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002327
2. Jebali H., Prikha W., Bouassida M. Assessment of Carillo's theory for improved Tunis soft soil by geodrains. In: *Proc. 18th Int. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. Pp. 2509–2512.
3. Manish V. Shah, Arvind V. Shroff. Soil-structure interaction of soft clay using prefabricated vertical geodrains under seismic stresses. *Missouri University of Science and Technology*. 2010; (5.53a): 1–8.
4. Sven Hansbo. Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains. *Swedish Geotechnical Institute Proceedings*. 1960; (18): 1–166.
5. Leelamanie D.A.L. Changes in soil water content with ambient relative humidity in relation to the organic matter and clay. *Tropical Agricultural Research and Extension*. 2010;(13): 6–10. DOI: 10.4038/tare.v13i1.3130
6. Lucas Martina, Vahid Alizadehb, Jay Meegodaa. Electro-osmosis treatment techniques and their effect on dewatering of soils, sediments, and sludge: A review. *Soils and Foundations*. 2019; (59): 407–418. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.12.015

7. Estabragh A.R., Naseh M., Javad A.A. Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. *Electrochimica Acta*. 2015; (95): 32–36. DOI: 10.1016/j.clay.2014.03.019
8. Jayasekera S. Electrokinetics to modify strength characteristics of soft clayey soils: A laboratory based investigation. *Applied Clay Science*. 2014; 181 (6): 39–47.
9. Ali Akbar Firoozi, C. Guney Olgun, Ali Asghar Firoozi, Mojtaba Shojaei Baghini. Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*. 2017; (26): 1–16. DOI: 10.1186/s40703-017-0064-9
10. Chang-Yu Ou, Shao-Chi Chien, Yi-Guang Wang. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions. *Applied Clay Science*. 2009; (44): 130–136. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000819
11. Abdullah W.S., Al-Abadi A.M. Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil. *Applied Clay Science*. 2010. (47): 343–350. DOI: 10.1016/j.clay. 2009.11.046
12. Amir Hossein Vakili, Mohammad Kaedi, Mehdi Mokheri, Mohamad Razip bin Selamat, Mahdi Salim. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application. *Applied Clay Science*. 2018; (152): 1–8. DOI: 10.1016/J. CLAY.2017.11.039
13. Prusinski J., Bhattacharja S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record*. 1999; (1652): 215–227. DOI: 10.3141/1652-28
14. Ramdane Bahar, Mouloud Benazzoug, Said Kenai. Durability of earth stabilized material. *Key Engineering Materials*. 2014; (600): 495–503. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.600.495
15. Young-sang Kim, Thien Quoc Tran, Gyeong-o Kang, Tan Manh Do. Stabilization of a residual granitic soil using various new green binders. *Construction and Building Materials*. 2019; (223): 724–735. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.019
16. John E. Sani, Roland Kufre Etim, Alexander Joseph. Compaction behaviour of lateritic soil–calcium chloride mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018; 1–20. DOI: 10.1007/s10706-018-00760-6
17. Ramana Murty V., Hari Krishna P. Amelioration of expansive clay slopes using calcium chloride. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007; 19–25. DOI: 10.1680/GRIM. 2006.10.1.39
18. Bahrām Ta'negonbadi, Reza Noorzad. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*. 2017; 1–38. DOI: 10.1016/J. TRGEO.2017.08.004
19. Slobodchikova N.A. Scientific basis for the selection of lime reinforced soils. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2017. (4): 1–7. (In Russian)
20. Little D.N. Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime, Kendall. Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995.
21. Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly. The effects of various lime products for soil drying. In: Technical Report Carmeuse Lime Company. 2007. Pp. 1–10.
22. Emmanuel Sunday Ajayi. Improvement Effect of lime variation on the moisture content and dry density of lateritic soil in Ilorin, Nigeria. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*. 2012; 2 (4): 159–162.
23. Noor S.T., Uddin R. Effect of lime stabilization on the alteration of engineering properties of cohesive soil. Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. Pp. 1257–1267. DOI: 10.1007/978-981-10-8016-6_88
24. Mamatha K.H., Dinesh S.V. Resilient modulus of black cotton soil. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017; 1–41. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.01.008
25. Mavroulidou M., Zhang X., Michael J. Gunn, Cabarkapa Z. Water retention and compressibility of a lime-treated, high plasticity clay. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2013; 1171–1185. DOI: 10.1007/s10706-013-9642-6
26. Khattab S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.-M. Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007. Pp. 358–366. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:4(358)
27. Bhaskar C.S., Chittoori, Anand J. Puppala, Aravind Pedarla. Addressing clay mineralogy effects on performance of chemically stabilized expansive soils subjected to seasonal wetting and drying. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2018; 1–25. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001796
28. López-Laraa T., Hernández-Zaragoza J.B., Horta-Rangel J., Rojas-González E., López-Ayalab S., Castañob V.M. Expansion reduction of clayey soils through Surcharge application

- and lime treatment. *Case Studies in Construction Materials*. 2017; (7): 102–109. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.06.003
29. Guillaume Stoltz, Olivier Cuisinier, Farimah Masrouri. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles. *Engineering Geology*. 2014; (181): 281–289. DOI: 10.1016/J.ENGGEOL.2014.08.013
30. Asmaa Al-Taie, Disfani M., Evans R., Arulrajah A. Collapse and swell of lime stabilized expansive clays in void ratio–moisture ratio–net stress space. *International Journal of Geomechanics*. 2019; (19): 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001488
31. Pat Harris, Tom Scullion, Stephen Sebesta. Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing soils in Texas. Technical Report Documentation, Report No. FHWA/TX-04/0-4240-2, 2004. P. 46.

Сведения об авторах

Алькаев Евгений Николаевич, аспирант, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, alkaev.en@yandex.ru

Лунёв Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, lun-ev.al.al@gmail.com

Authors Details

Evgeny N. Alkaev, Research Assistant, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, alkaev.en@yandex.ru

Aleksandr A. Lunev, PhD, A/Professor, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, lunev.al.al@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 19.12.2022
Одобрена после рецензирования 11.05.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 19.12.2022
Approved after review 11.05.2023
Accepted for publication 16.05.2023

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

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

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 185–196.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 185–196.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.168:625.861

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196

EDN: TQJNLC

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ВОЛОКОН ДИСПЕРСНОЙ АРМАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич

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

Аннотация. Растущий интерес к дисперсному армированию асфальтобетона порождает необходимость исследований в области анализа и оценки характеристик используемых химических волокон. Полимерные волокна, играющие роль арматуры, могут качественно изменяться под влиянием внешних факторов и влиять на качество дорожных покрытий.

Исследованы исходные волокна дисперсной арматуры из термопластического волокнообразующего полимера и из минеральных нитей, волокна, извлеченные из асфальтобетона, а также волокна, подвергшиеся светопогодному воздействию в везерометре марки ИП-1-3. В исследованиях использовался металлографический микроскоп МИМ-10 и двухлучевой ИК-спектрофотометр Спекорд М80. Физико-химические испытания волокон проведены в аттестованной лаборатории АК «Химволокно».

Цель работы – установление наличия или отсутствия деформаций, разрушений, деформации волокон дисперсной арматуры при изготовлении асфальтобетонных смесей, содержащих полимерные волокна.

Установлено, что волокна дисперсной арматуры из термопластичных волокнообразующих полимеров деформируются при уплотнении асфальтобетонной смеси в местах воз-

действия зерен минерального материала. В то же время минеральные волокна, используемые в качестве дисперсной арматуры, таких деформаций не претерпевают. Показано, что на свойства волокон практически не влияют природно-климатические факторы.

По результатам исследований сделаны выводы, что воздействие природно-климатических факторов не приводит к деструкции волокон дисперсной арматуры. Показатели свойств армирующих волокон изменяются слабо, что позволяет им осуществлять функцию армирования на протяжении установленных сроков службы асфальтобетонных покрытий. Вдавливание зерен минерального материала в волокна из термопластичных волокнообразующих полимеров приводит к заклиниванию волокон зернами, препятствуя их выдергиванию, повышая тем самым прочностные и реологические свойства асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, ИК-спектры, полиамидные волокна, дисперсная арматура из синтетических волокон, дисперсная арматура из минеральных волокон, фиброасфальт, адсорбционно-сольватная оболочка

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Исследование изменений состояния и свойств волокон дисперсной арматуры в процессе строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 185–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196. EDN: TQJNLC

ORIGINAL ARTICLE

MODIFICATION OF CONDITIONS AND PROPERTIES OF DISPERSED REINFORCING FIBER DURING CONSTRUCTION AND OPERATION OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: Identification of deformation presence or absence, fiber destruction in manufacturing asphalt concrete mixes containing polymer fiber.

Methodology: Initial dispersed reinforcing fiber made of thermoplastic fiber-forming polymer and mineral thread, fiber extracted from asphalt concrete, and fiber exposed to weather conditions are investigated using a weatherometer IP-1-3. An MIM-10 metallographic microscope is used for the metallographic analysis. The infrared spectrophotometer SPECORD M-80 is used for the material identification. Physicochemical tests of fiber are carried out in a certified laboratory "Khimvolokno".

Research findings: Dispersed reinforcing fiber made of thermoplastic fiber-forming polymers show deformation in compacting the asphalt-concrete mix at impact points of mineral material grains. At the same time, mineral fiber used as a dispersed reinforcement is not subjected to such deformation. The fiber properties are not affected by natural and climatic factors. It is found that natural and climatic factors do not cause the fiber destruction in dispersed reinforcement. The properties of reinforcing fiber slightly change, which allows them to perform a reinforcing function throughout the established service life of asphalt concrete pavements. Indentation of mineral material grains into fiber made of thermoplastic polymers leads to fiber jamming by grains, that prevents them from being pulled out, that, in turn, increases strength and rheological properties of asphalt concrete.

Value: The analysis of chemical fiber characteristics is required to satisfy the growing interest in dispersed reinforcement of asphalt concrete. The quality of polymer fiber used for reinforcement can be changed under the influence of external factors and affect the quality of road pavements.

Keywords: asphalt concrete mixture, polyamide fiber, synthetic fiber, mineral fiber, fiber-asphalt concretes, adsorption-solvation bitumen shells

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Modification of conditions and properties of dispersed reinforcing fiber during construction and operation of asphalt concrete pavements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 185–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196. EDN: TQJNLC

Введение

Основным фактором, влияющим на комплекс свойств асфальтобетона, является его структура. Л.Б. Гезенцев и др. [1] установили, что повышение качественно важных характеристик дорожных асфальтобетонов достигается путем изменения их структуры. К таким воздействиям, улучшающим широкий спектр показателей асфальтобетона, относится дисперсное армирование [2, 3, 4]. Одним из вариантов дисперсного армирования асфальтобетона является внедрение в структуру отрезков полимерных волокон, улучшающих его реологические и физико-механические свойства. Как следствие, снижается риск появления деформаций асфальтобетонных покрытий. Зарубежными и российскими учеными показана высокая эффективность полимерно-дисперсного армирования (ПДА). Установлено, что ПДА образует пространственную армирующую решетку, которая при температуре 50 °С повышает сдвигоустойчивость асфальтобетона на 25–30 %, а при отрицательных температурах повышает прочность при растяжении на 40–80 %. Деформативность при отрицательных температурах достигает 90–200 %. Максимальное (200–500 %) положительное влияние происходит в отношении усталостной прочности [2, 3, 4, 5].

Представляет интерес расположение волокон дисперсной арматуры среди зерен минерального материала и процессы, происходящие в адсорбционно-сольватных слоях битума. Структура этих слоев содержит твердообразную структурированную и диффузную зоны, что установлено в работах [1, 6]. Диффузная зона рассматривается как переходная между адсорбционно-сольватным (ориентированным) слоем и объемным битумом [7].

Очень важным и в то же время слабо изученным является вопрос изменения состояния, пространственного расположения и свойств волокон дисперсной арматуры в процессе строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий, поскольку в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси волокна дисперсной арматуры подвергаются давлению со стороны более прочных минеральных зерен. При эксплуатации асфальтобетонного покрытия на волокна воздействует целый комплекс техногенных и природно-климатических факторов. Это подвижная нагрузка, вызывающая знакопеременные напряжения в покрытии, высокие положительные и отрицательные температуры, частое сезонное замораживание и оттаивание, чередующиеся процессы увлажнения и высыхания, а также ветровое воздействие, агрессивное влияние соледержащих растворов, используемых для устранения скользкости, и ультрафиолетовая составляющая солнечного излучения – один из самых мощных факторов, разрушающих полимеры.

На основании вышесказанного представляется актуальным проведение исследований в области анализа и оценки физических и химических характеристик компонентов ПДА на протяжении жизненного цикла.

Материалы и методы исследований

Методы контроля качества асфальтобетонных композиций, указанные в нормативных документах, не позволяют дать объективную оценку и прогноз ПДА в условиях реальной рабочей нагрузки. С этим обстоятельством связан авторский подход к выбору методов исследований: изучение теоретических данных [6–9], металлографическая микроскопия, климатическое моделирование, ИК-спектроскопия.

Расположение отрезков полимерных волокон арматуры в адсорбционно-сольватных слоях битума рассматривалось теоретически, путем сравнения толщины этих слоев с диаметром волокон. Ранее толщина ориентированных слоев битума изучалась главным образом косвенными методами исследований. Реальная толщина битумной пленки для нефтяного битума марки БНД 60/90 экспериментально определена в работе [8] (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерения битумной пленки на образцах минерала (известняка) по данным работы [8]

Table 1

Bituminous film thickness on limestone particles (adopted from [8])

Размер частиц известняка, мм	< 0,14 (асфальтовое вяжущее)	0,14–3,0 (асфальтовый раствор)	3–10 (песок и щебень)
Толщина битумной пленки, мкм	< 6	62–64	46–80

На толщину волокон, используемых в качестве дисперсной арматуры, влияет состав вещества, из которого они изготовлены, и способ формования. В табл. 2 приведены результаты измерений диаметра различных видов волокон по данным авторов работ [9, 10].

Таблица 2

Сравнительная оценка толщины волокон, пригодных для дисперсного армирования (по данным [9, 10])

Table 2

Fiber thickness for dispersed reinforcement (adopted from [9, 10])

Вид волокна и способ формования	Диаметр волокна, мкм
Полимерные волокна, полученные способами формования	
Из раствора	40–100
Из расплава	250–1000

Окончание табл. 2

End of table 2

Вид волокна и способ формования	Диаметр волокна, мкм
Виды минеральных волокон	
Микроволокно	0,5
Ультратонкое	0,5–1
Супертонкое	1–3
Тонкое	3–11
Утолщенное	11–20
Грубое	20
Отходы минеральных волокон	20–150

Воздействие уплотняющей нагрузки на состояние и форму волокон дисперсной арматуры в асфальтобетоне исследовалось на металлографическом микроскопе МИМ-10. Для этого из сформованных образцов асфальтобетона с помощью органического растворителя (солянки) извлекалась дисперсная арматура, приготовленная из термопластичного волокнообразующего полимера (полиамидные нити-жгуты с линейной плотностью 250 текс) и дисперсная арматура в виде минеральных фибр (стекловолокно с номинальным диаметром элементарной нити в пределах 10–120 мкм). С помощью микроскопа МИМ-10 получены оптические изображения этих волокон с увеличением в 100 и 250 раз. Также получены изображения исходных волокон, не использовавшихся в составе образцов асфальтобетона.

Исследование влияния природно-климатических факторов на полимерные волокна (атмосферостойкость) проводилось с использованием везерометра – камеры искусственной светопогоды марки ИП-1-3. Камера имитирует воздействие температур, влажности, УФ-диапазона солнечного излучения, соответствующих разным типам климата. Моделирование процесса разрушительного воздействия на исследуемый материал под действием воды, перепадов температур и ультрафиолетовой энергии света проводили по стандартной методике с применением условий испытаний, приближенных к региональным (Западная Сибирь).

Образцы для испытания дисперсной арматуры подготовлены следующим образом. Из катушки полиамидной жгутовой нити с линейной плотностью 250 текс (выбиралась случайным образом) брали 3 группы образцов. Длина образца составляла 50 м в каждой группе. Образцы 1-й группы считались контрольными (эталонными) и не подвергались обработке. Образцы 2-й группы помещали в битум марки БНД 90/130, широко применяемый в дорожном строительстве Западно-Сибирского региона. После определенного времени их извлекали и очищали в растворителе (гексан). Гексан для очистки волокон выбран как доступный и наиболее чистый реагент, подходящий для идентифика-

ции полос поглощения при исследованиях методом ИК-спектроскопии. Образцы 3-й группы нитей обрабатывались вышеупомянутым битумом, после чего подвергались старению в везерометре. Рабочий режим имитировал северные светоклиматические условия. Число циклов выбрано так, чтобы воздействие соответствовало 18-летнему сроку службы дорожного асфальтобетона. После светопогодного воздействия образцы отмывались от битума в гексане. Все подготовленные полиамидные образцы исследовались в химической лаборатории АК «Химволокно», Кемерово.

Исследование химического поведения дисперсной арматуры из полиамидных волокон под воздействием внешних факторов проводили методом ИК-спектроскопии на спектрофотометре Спекорд М80.

Результаты исследований и их обсуждение

На основе данных, представленных в табл. 1 и 2, выполнена оценка толщины битумной пленки на зернах различного размера с диаметрами волокон дисперсной арматуры. На основании анализа этих величин сделаны выводы об особенностях фиксации волокон арматуры разного химического состава в адсорбционных слоях битума.

На толщину волокна дисперсной арматуры влияют химический состав и свойства полимерного материала, а также способ получения. Согласно данным из табл. 1 и 2, диаметры волокон разных видов дисперсной арматуры больше, чем толщина ориентированного слоя битума на поверхности минерального материала.

Существует возможность реализации различных вариантов размещения волокон дисперсной арматуры относительно минеральных частиц. При армировании горячего асфальтобетона микро-, ультра- и супертонкими волокнами толщина создаваемой битумной пленки превышает диаметр волокон, причем как в асфальтовом растворе, так и в асфальтовом вяжущем. Как следствие, волокна располагаются в адсорбционных слоях битума.

Более толстые волокна выходят за пределы адсорбционных слоев минерального порошка. Минеральные волокна не размягчаются при нагревании до температур, необходимых для приготовления и укладки асфальтобетонных смесей. Это позволяет им не деформироваться и раздвигать минеральные частицы, находящиеся в приготавливаемой асфальтобетонной смеси. Если диаметр применяемых минеральных волокон больше 24 мкм, то они раздвигают минеральные зерна, находящиеся в асфальтовом растворе. При диаметре волокон 80 мкм и более будут раздвигаться как минеральные, так и щебневые зерна. В результате наблюдается процесс взаимодействия частиц минерального материала не через ориентированный, а через объемный слой битума. Это снижает прочностные характеристики битумо-минеральных смесей при воздействии отрицательных температур. Следует отметить позитивную сторону такого эффекта: при создании небольшого избытка против требуемого регламентом количества объемного битума замедляется старение полученного асфальтобетонного покрытия.

При использовании волокон с диаметром меньше 80 мкм они располагаются без деформации на частицах щебня в ориентированном слое битума.

В случае термопластичных синтетических полимеров картина иная. В асфальтовом вяжущем и асфальтовом растворе может произойти деформирование и раздавливание подобных волокон. Причиной этого является проявление пластических качеств полимерными материалами при высокотемпературном воздействии. Термопласты легче мнутся и деформируются при технологических операциях в процессе дорожного строительства. При уплотнении армированной асфальтобетонной смеси катками мягкие полимерные волокна зажимаются между минеральными частицами. Такое армирование улучшает физико-механические показатели качества дорожного асфальтобетона.

Методом оптической микроскопии проведено сравнение геометрической формы волокон дисперсной арматуры до помещения ее в асфальтобетонную смесь и после уплотнения асфальтобетонной смеси, содержащей волокна дисперсной арматуры. В процессе уплотнения асфальтобетонной смеси волокна деформируются по длине и диаметру (толщине). В настоящей работе исследовались деформации волокон только по диаметру.

На рис. 1 представлены оптические изображения исходных волокон дисперсной арматуры из термопластических и минеральных нитей.

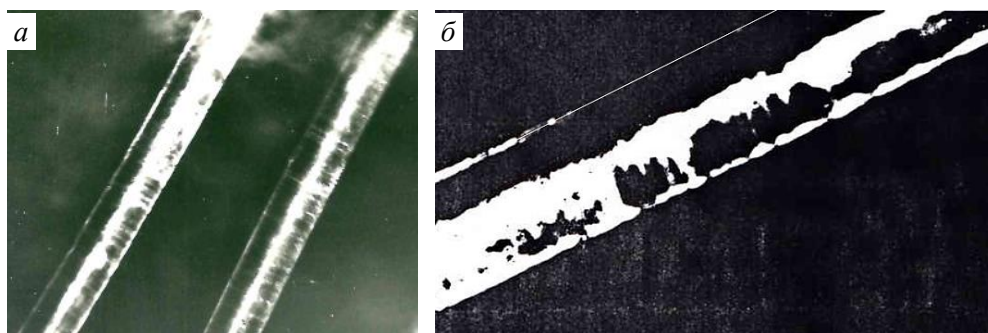


Рис. 1. Микрофотографии исходных волокон дисперсной арматуры. Увеличение $\times 250$:
 а – минеральное (стекловолокно); б – термопластическое (полиамидное) волокно
 Fig. 1. Optical images of initial fiber of dispersed reinforcement. Magnification: 250 $\times$:
 a – mineral fiber (fiberglass); b – thermoplastic (polyamide) fiber

Из рис. 1 видно, что образцы стекловолоконных и полиамидных нитей имеют строго цилиндрическую форму без каких-либо деформаций.

На рис. 2 приведены оптические изображения волокон дисперсной арматуры из термопластического волокнообразующего полимера (полиамида), извлеченных из образца дисперсно-армированного асфальтобетона, уплотненного стандартной нагрузкой. Микрофотографии армирующих волокон из минеральных нитей (стекловолокна), извлеченных из образца асфальтобетонной смеси, уплотненной стандартной нагрузкой, в работе не представлены, поскольку они не претерпели деформаций и имели форму, идентичную исходным образцам волокон.

Из анализа рис. 2 можно сделать заключение, что армирующие волокна из термопластического волокнообразующего полимера при уплотнении асфальтобетонной смеси получили значительные деформации и имеют различ-

ную форму и поперечные размеры по длине волокон. Эти изменения толщины волокон по длине свидетельствуют о том, что волокна дисперсной арматуры надежно защемлены минеральными зернами в асфальтобетоне. Такие волокна более эффективно воспринимают растягивающие напряжения, возникающие при деформации асфальтобетона под воздействием подвижной нагрузки и природно-климатических факторов, что обеспечивает улучшение прочностных и реологических свойств асфальтобетона и увеличивает срок службы покрытия.

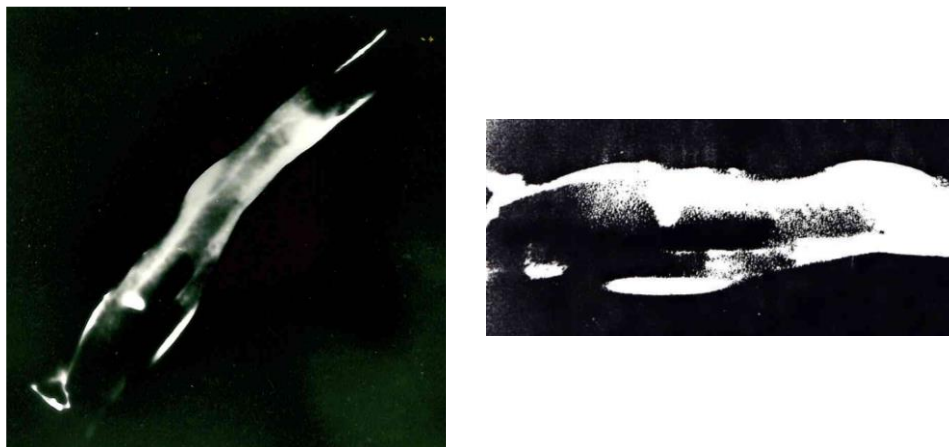


Рис. 2. Микрофотографии волокон дисперсной арматуры из полиамида, извлеченных из образца асфальтобетонной смеси, уплотненной стандартной нагрузкой. Увеличение $\times 250$

Fig. 2. Optical images of polyamide fiber of dispersed reinforcement extracted from asphalt concrete mix compacted by standard load. Magnification: $250\times$

Проведено исследование физико-химических показателей полиамидных волокон, которые проявляются в модельном эксперименте при взаимодействии с битумом. Роль волокон выполняли полиамидные жгутовые нити.

Характеристические показатели полимерных нитей в основном не изменились в ходе эксперимента, имитирующего реальные процессы, происходящие при подготовке, строительстве и эксплуатации дисперсно-армированной дорожной одежды (табл. 3). В результате контакта с нефтяным битумом относительная вязкость полиамидных нитей повысилась на 0,04 ед. После обработки в условиях, симулирующих в светопогодной камере 18-летний срок службы дорожного покрытия, эта величина незначительно увеличилась. Сделан вывод, что показатель относительной вязкости главным образом зависит от микровзаимодействия волокон с нефтяным битумом.

После обработки полиамидных волокон нефтебитумом массовая доля экстрагируемых веществ снизилась на 0,6 %, термостабильность не изменилась. На термостабильность полиамидных волокон оказали сильное воздействие процессы, происходящие при старении: регистрируется рост в 3,5 раза. Температура плавления полиамидного полимера оставалась постоянной не только после его контакта с битумом, но и после искусственного старения.

Количественное значение разрывной удельной нагрузки повысилось почти на 20 % после обработки волокон битумом. После смоделированного старения (18 лет службы в составе материала дорожного покрытия) эта величина уменьшилась почти наполовину по сравнению с контрольным образцом. Процессы старения снизили (более чем на 40 %) величину удлинения полиамидного волокна при разрыве.

Таблица 3

**Физико-химические показатели полиамидных армирующих волокон
и их изменение в процессе искусственного старения
дисперсно-армированного асфальтобетона**

Table 3

**Physicochemical properties of polyamide fiber and its change during
artificial aging of dispersion-reinforced asphalt concrete**

Наименование показателей	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Относительная вязкость, отн. ед.	2,46	2,5	2,51
Содержание экстрагируемых веществ, %	2,6	2,0	1,5
Термостабильность, усл. ед.	0,2	0,2	0,7
Температура плавления, °С	215	215	216
Удельная разрывная нагрузка, гс/текс	15,9	19,3	8,1
Удлинение при разрыве, %	45,6	47,7	26,9

Интерес представляют изменения, происходящие в дисперсной арматуре из полиамидных волокон, выявленные ИК-спектроскопией. Результаты исследований представлены на рис. 3.

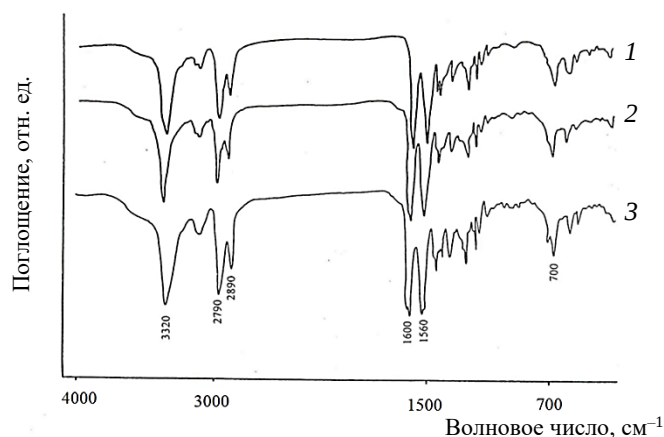


Рис. 3. ИК-спектры полиамидных волокон:

1 – исходное состояние; 2 – после обработки битумом и очистки гексаном;
3 – после обработки битумом, искусственного светопогодного старения и очистки гексаном

Fig. 3. IR spectra of polyamide fiber:

1 – initial state; 2 – after bitumen treatment and cleaning with hexane; 3 – after bitumen treatment, artificial weather aging and cleaning with hexane

Расшифровка полученных спектров на основании сведений из работ [11–14] показала следующее. ИК-спектры всех образцов волокон имеют характеристические полосы поглощения (ПП) в области 1640–1690 см⁻¹. Пик с ПП 1660 см⁻¹ принято относить к так называемой полосе амид-I, обусловленной колебаниями карбонильной группы (C=O). Считается, что свободная N–H группа обуславливает (в дополнение к ПП C=O) следующие полосы валентных колебаний:

1) N–H при 3050–3550 см⁻¹ (пик соответствует транс-форме, его ПП 3320 см⁻¹);

2) деформационные колебания –N–H при 1530–1570 см⁻¹ (пик с ПП 1560 см⁻¹, полоса амид-II).

ПП в области 1300 см⁻¹ связана с колебаниями связи C–N и накладывающимися колебаниями N–H, это так называемая полоса амид-III. О возникновении межмолекулярных и водородных связей говорит сдвиг полосы N–H в низкочастотную область. Зафиксированы информативные ПП в средней области спектра (957, 974 см⁻¹). Вероятнее всего, они связаны с сигналами метиленовых звеньев CH₂.

Деформационные колебания N–H проявляют себя интенсивной широкой полосой (650–900 см⁻¹) с пиком ПП 700 см⁻¹. Слабые ПП в области 1030–1230 см⁻¹ характеризуют валентные колебания C–N, хотя трудно отличить их от валентных колебаний C–C. Дуплет 2970 и 2890 см⁻¹ может соответствовать валентным колебаниям C–H. В пользу такого отнесения полос поглощения свидетельствует рост их интенсивности у образца 3, прошедшего процедуру старения.

Сравнение полученных спектральных данных для полиамидных волокон (чистых, обработанных битумом и состаренных) показало отсутствие существенного влияния со стороны указанных воздействий на свойства волокон. Сделанный вывод хорошо согласуется с результатами работы [15], где показана возможность агрессивного воздействия окружающей среды на полипропиленовое волокно в составе асфальтобетонных смесей. С помощью физико-химических методов анализа образцов, армированных полипропиленовым волокном, установлено, что в условиях низкотемпературного воздействия даже в присутствии антигололедных солей образцы дисперсно-армированного асфальтобетона сохраняли высокую прочность, долговечность, ударную вязкость и другие важные потребительские качества.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что волокна, используемые для армирования асфальтобетонной смеси, могут распределяться либо в адсорбционно-сольватных оболочках битума, либо за их пределами. Минеральные волокна диаметром более 24 мкм могут создавать эффект расклинивания (раздвижки) контактирующих с ними частиц минерального материала, что требует корректировки зернового состава асфальтобетонной смеси при её проектировании.

При использовании дисперсной арматуры из термопластичных полимерных волокон происходит их деформация в результате уплотнения асфальтобетонной смеси. Это обеспечивает надежное защемление волокон дисперсной арматуры зёрнами минерального материала, затрудняющее выдергивание воло-

кон в условиях приложения нагрузок. В результате в слое асфальтобетонного покрытия образуется пространственная армирующая решетка, элементы которой прочно защемлены зернами минерального материала, что и является причиной повышения прочности и сдвигоустойчивости этого конструктивного слоя. Физико-химический анализ полиамидных армирующих волокон свидетельствуют о незначительном изменении свойств волокон дисперсной арматуры под воздействием ультрафиолета и природно-климатических нагрузок, что позволяет им в полной мере выполнять армирующие функции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гезенцев Л.Б., Горельшев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон / под ред. Л.Б. Гезенцева. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.
2. Sevil K., Perviz A., Baurzhan K. Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics // *Construction and Building Materials*. 2014. V. 73. P. 592–602.
3. Süreyya T., Halit Ö., Atakan A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers // *Construction and Building Materials*. 2007. V. 21. P. 328–337.
4. Лукашевич В.Н., Ефанов И.Н. Применение теории перколяции для исследования процессов структурообразования дисперсно-армированных асфальтобетонов // *Техника и технология дорожного хозяйства*. 2014. № 2 (28). С. 29–39.
5. Чернов С.А., Каклюгин А.В., Никитина А.Н., Голюбин К.Д. Влияние полимерно-дисперсно-армирующей добавки на эксплуатационные свойства асфальтобетона // *Вестник МГСУ*. 2017. Вып. 12. № 6 (105). С. 654–660. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.654-660
6. Королев И.В. Модель строения битумной пленки на минеральных зернах в асфальтобетоне // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1981. № 8. С. 63–67.
7. Королев И.В., Агеева Е.Н., Головкин В.А., Фоменко Г.Р. Дорожный теплый асфальтобетон. 2-е изд., испр. и доп. Киев : Вища шк., Головное изд-во, 1984. 200 с.
8. Королев И.В. О толщине битумной пленки в асфальтобетоне // *Исследование свойств битумов, применяемых в дорожном строительстве : труды Союздорнии*. 1970. Вып. 46. С. 20–26.
9. Зазулина З.А., Дружинина Т.В., Конкин А.А. Основы технологии химических волокон. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Химия, 1985. 304 с.
10. Роговин З.А. Основы химии и технологии химических волокон. Санкт-Петербург : СПГУТД, 2001. 148 с.
11. Белами Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул : пер. с англ. Москва : Мир, 1971. 319 с.
12. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений : пер. с англ. Москва : Мир, 1965. 216 с.
13. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 493 с.
14. Иванова Л.В., Сафиева Р.З., Кошелев В.Н. ИК-спектрометрия в анализе нефти и нефтепродуктов // *Вестник башкирского университета*. 2008. Т. 13. № 4. С. 869–874.
15. Niyazi U.K., Sevil K. Aggressive environmental effect on polypropylene fibre-reinforced hot mix asphalt // *Procedia Engineering* 2016. V. 16. P. 963–969. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.834

REFERENCES

1. Gezentsvei L.B. (Ed.), Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. Asphalt concrete. 2nd ed., Moscow: Transport, 1985. 350 p. (In Russian)
2. Sevil K., Perviz A., Baurzhan K. Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics. *Construction and Building Materials*. 2014; (73): 592–602.
3. Süreyya T., Halit Ö., Atakan A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*. 2007; (21): 328–337.

4. Lukashevich V.N., Efanov I.N. Application of percolation theory in studying structure formation of dispersion-reinforced asphalt concrete. *Tekhnika i tekhnologiya dorozhnogo khozyaistva*. 2014; 2 (28): 29–39. (In Russian)
5. Chernov S.A., Kaklyugin A.V., Nikitina A.N., Golyubin K.D. Influence of polymer dispersion-reinforcing additive on asphalt concrete performance. *Vestnik MGSU*. 2017; 6 (105): 654–660. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.654-660 (In Russian)
6. Korolev I.V. Model of bitumen film structure on mineral grains in asphalt concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1981; 8: 63–67. (In Russian)
7. Korolev I.V., Ageeva E.N., Golovko V.A., Fomenko G.R. Warm asphalt concrete, 2nd ed. Kiev: Vishcha shk, 1984. 200 p. (In Russian)
8. Korolev I.V. Bituminous film thickness in asphalt concrete. *Soyuzdornii*. 1970; 46: 20–26. (In Russian)
9. Zazulina Z.A., Druzhinina T.V., Konkin A.A. Fundamentals of chemical fiber technology, 2nd ed., Moscow: Khimiya, 1985. 304 p. (In Russian)
10. Rogovin Z.A. Fundamentals of chemistry and chemical fiber technology. Saint-Petersburg, 2001. 148 p. (In Russian)
11. Bellamy L.J. The infra-red spectra of complex molecules. Moscow: Mir, 1971. 319 p. (Russian translation)
12. Nakanisi K. Infrared spectra and structure of organic compounds. Moscow: Mir, 1965. 216 p. (Russian translation)
13. Lebedev A.T. Mass spectrometry in organic chemistry. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2003. 493 p. (In Russian)
14. Ivanova L.V., Safieva R.Z., Koshelev V.N. IR spectrometry in the analysis of oil and petroleum products. *Vestnik bashkirskogo un-ta*. 2008; 13 (4): 869–874. (In Russian)
15. Niyazi U.K., Sevil K. Aggressive environmental effect on polypropylene fibre reinforced hot mix asphalt. *Procedia Engineering*. 2016; 161: 963–969. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.834

Сведения об авторах

Лукашевич Виктор Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vnluc@yandex.ru

Лукашевич Ольга Дмитриевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, odluk@yandex.ru

Authors Details

Viktor N. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vnluc@yandex.ru

Olga D. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, odluk@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 25.04.2023
Одобрена после рецензирования 28.04.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 25.04.2023
Approved after review 28.04.2023
Accepted for publication 16.05.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 197–207.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 197–207.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.731.2:624.138.24

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-197-207

EDN: NILPUA

**ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ КАПИЛЛЯРНОГО БАРЬЕРА
ИЗ ИНЪЕКТИРОВАННОГО РАСТВОРА
ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

Денис Алексеевич Разуваев, Михаил Геннадьевич Чахлов
*Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. Проблема разрушения конструкции дорожной одежды в результате действия сил морозного пучения на эксплуатируемых автомобильных дорогах для многих регионов России остается весьма актуальной.

Одним из эффективных способов регулирования величины морозного пучения земляного полотна автомобильных дорог в неблагоприятных грунтово-климатических условиях является устройство капиллярного барьера. Данный способ с использованием инъекционных методов преобразования грунтов ранее обоснован авторами по результатам полевых и лабораторных исследований.

Тем не менее для практического применения предложенного способа важнейшими нерешенными задачами исследования являются определение расчетной глубины расположения капиллярного барьера в теле земляного полотна и его оптимальной мощности.

Цель исследования: расчетное обоснование границ капиллярного барьера из инъектированного раствора для предотвращения морозного пучения земляного полотна.

Методологическую основу работы составляют методы теоретического исследования, такие как абстрагирование, анализ и синтез.

Результаты исследования: сформулировано условие перевода «открытой» системы промерзания в «закрытую» и предложены критерии при создании капиллярного барьера; получено решение для определения максимальной толщины капиллярного барьера, которое зависит от свойств его материала и коэффициента влагопроводности; представлено решение задачи о расположении капиллярного барьера в теле эксплуатируемого земляного полотна, которое основано на привязке зоны интенсивного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве.

Ключевые слова: капиллярный барьер, эксплуатируемое земляное полотно, инъекция в грунты, силикатизированный грунт, сезонное промерзание, морозное пучение

Для цитирования: Разуваев Д.А., Чахлов М.Г. Обоснование границ капиллярного барьера из инъектированного раствора для предотвращения морозного пучения земляного полотна // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 197–207. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-197-207. EDN: NILPUA

ORIGINAL ARTICLE

ARRANGEMENT OF CAPILLARY BARRIER MADE OF INJECTED SOLUTION TO PREVENT SUBGRADE FROST HEAVING**Denis A. Razuvaev, Mikhail G. Chakhlov***Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia*

Abstract. The problem of road pavement deterioration due to the forces of frost heave on operating roads remains highly relevant for many regions of Russia.

One of the effective methods for regulating the magnitude of frost heave in the roadbed of highways under unfavorable soil-climatic conditions is the installation of a capillary barrier. This method, using injection methods for soil transformation, has been previously justified by the authors based on field and laboratory research.

However, for practical implementation of the proposed method, the key unresolved research tasks are the determination of the calculated depth of the capillary barrier within the roadbed and its optimal thickness.

In this regard, the aim of the research is to provide a calculated justification for the boundaries of the capillary barrier made from injected solution to prevent frost heave in the roadbed.

The methodological basis of the study includes theoretical research methods such as abstraction, analysis, and synthesis.

The article formulates the condition for transitioning from an "open" freezing system to a "closed" system and proposes criteria for creating a capillary barrier. A solution is obtained to determine the maximum thickness of the capillary barrier, which depends on the properties of its material and the coefficient of moisture conductivity. The solution to the problem of locating the capillary barrier within the structure of the operating roadbed is presented, based on correlating the zone of intensive moisture transfer with the isotherms of temperatures in the freezing massif.

Keywords: capillary barrier, subgrade, soil injection, silicified soil, seasonal freezing, frost heaving

For citation: Razuvaev D.A., Chakhlov M.G. Arrangement of capillary barrier made of injected solution to prevent subgrade frost heaving. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (3): 197–207. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-197-207. EDN: NILPUA

Введение

Одним из эффективных способов регулирования водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог, и в частности величины морозного пучения, в условиях высокого залегания грунтовых вод и широкого распространения пучинистых грунтов является устройство капиллярного барьера.

Способ создания капиллярного барьера в земляном полотне (рис. 1) для эксплуатируемых автомобильных дорог с использованием инъекционных методов преобразования грунтов обоснован результатами полевых и лабораторных исследований и детально описан авторами в работах [1, 2].

Разработанная конструкция основана на технологии инъектирования (например, силиката натрия) и представляет собой совокупность объединенных преобразованных элементов грунта. Разработанный способ позволяет перевести открытую схему промерзания грунта в закрытую за счет прерывания

влажнопереноса в грунтах земляного полотна, что существенно снижает величину морозного пучения грунтов рабочего слоя земляного полотна. Кроме того, применение в нижней части зоны сезонного промерзания в качестве капиллярного барьера непучинистого материала с коэффициентом морозного пучения менее 1 % [3, 4] позволяет добиться дополнительного эффекта.

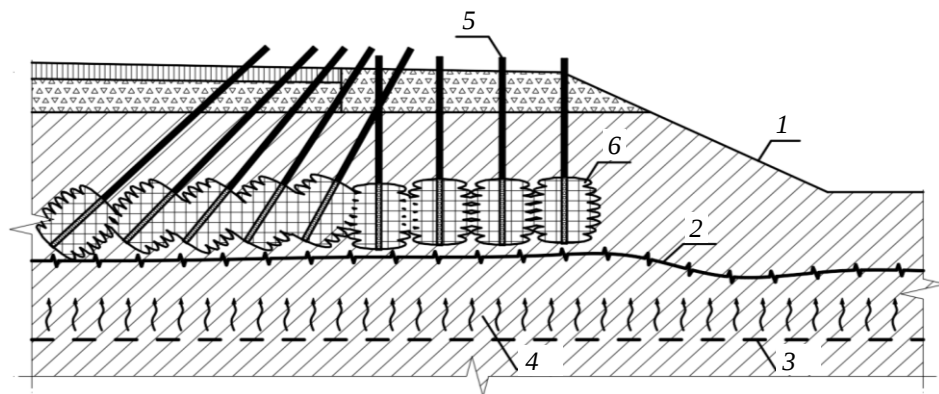


Рис. 1. Обобщенная конструкция земляного полотна с капиллярным барьером:

1 – земляное полотно; 2 – условная граница зоны сезонного промерзания; 3 – уровень грунтовых вод; 4 – зона капиллярной миграции воды; 5 – инъекторы; 6 – элементы капиллярного барьера из гидроизолирующего раствора, инъектированного в грунт

Fig. 1. Generalized design of subgrade with capillary barrier:

1 – subgrade; 2 – conventional boundary of seasonal freezing; 3 – ground water level; 4 – capillary water migration; 5 – injectors; 6 – elements of the capillary barrier made of waterproofing solution injected into the soil

Тем не менее для практического применения предложенного способа важнейшей задачей исследования является определение расчетной глубины расположения капиллярного барьера в теле земляного полотна и его оптимальной мощности.

Решение данной задачи позволит сделать дальнейший шаг к разработке методики проектирования капиллярного барьера, реализация которой существенно снизит величину морозного пучения рабочего слоя земляного полотна, и выполнить расчет деформации морозного пучения при проектировании как для закрытой системы по одному из известных решений [3, 5, 6].

Условие перехода к закрытой системе промерзания

Для решения поставленной задачи в первую очередь необходимо определить, что считается закрытой и открытой системой промерзания, а также каково условие перехода открытой в закрытую систему при создании капиллярного барьера.

В научной литературе отсутствуют четкие, общепризнанные определения закрытой и открытой системы промерзания. Тем не менее, в общем случае, под закрытой системой можно понимать такие условия, при которых основная миграция влаги при сезонном промерзании грунтов происходит только

за счет перераспределения собственных запасов воды в зоне сезонного промерзания [5, 7, 8]. При открытой системе, напротив, формируются условия, способствующие миграции (подтягиванию) значительного количества влаги в зону сезонного промерзания из нижележащих грунтов земляного полотна, что, как правило, сопровождается существенным льдообразованием с формированием различной криогенной текстуры [5, 7, 8]. На основании этого предлагаем считать условием перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера снижение объема криогенной миграции влаги $\Delta W_{\text{мг}}$ в зону сезонного промерзания из нижележащих грунтов земляного полотна до значения $\Delta W_{\text{мг}}^6$ и ниже, не оказывающего существенно-го влияния на величину морозного пучения дорожной одежды.

Величины объема криогенной миграции влаги соответственно в грунте и капиллярном барьере $\Delta W_{\text{мг}}$ и $\Delta W_{\text{мг}}^6$ определяются по известным решениям [3, 9] и в первую очередь зависят от коэффициентов влагопроводности грунта и материала капиллярного барьера соответственно.

Исходя из решения, полученного А.Л. Исаковым [5] для коэффициента пучения при закрытой системе $K_{\text{пуч}}^3$, максимальное значение указанного параметра в закрытой системе наблюдается в случае равенства предзимней влажности W_0 и влажности W_{sat} полностью водонасыщенного грунта. Следовательно, при обеспечении условия (1) при создании капиллярного барьера (подборе толщины барьера и его коэффициента влагопроводности для исходных значений градиентов температур и влажности) открытую систему с капиллярным барьером можно считать закрытой:

$$\Delta W_{\text{мг}}^6 \leq W_{\text{sat}} - W_0. \quad (1)$$

Расположение капиллярного барьера в теле земляного полотна

Для решения поставленной задачи, исходя из сформулированного условия перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера, рассмотрены существующие теории тепло- и массообмена [6, 7, 8].

В современном представлении на механизм криогенной миграции в различной степени влияют влагопроводные свойства грунтов в талой и мерзлой зонах, а также градиенты влажности и температуры (в некоторых источниках скорость промерзания). В общем случае, удельный поток влаги i_b достаточно полно описывается дифференциальным уравнением следующего вида [10]:

$$i_b = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_1 \frac{\partial w}{\partial x} + K_1 \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент влагопроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$; δ – термоградиентный коэффициент; $\frac{\partial w}{\partial x}$ и $\frac{\partial t}{\partial x}$ соответственно градиенты влажности и температуры.

Подход отечественных ученых к решению задачи прогноза влагонакопления в промерзающих грунтах достаточно различен и основан на некоторых

допущениях и эмпирических решениях. Тем не менее большинство авторов [3, 11, 12] сходятся во мнении, что при промерзании грунтов практически в любой момент времени существует зона интенсивного влагопереноса, близкая по глубине к зоне фазовых переходов, но не точно совпадающая с ней. Ниже зоны фазовых переходов снижаются градиенты температур и влажности, выше – существенно снижается коэффициент влагопроводности, т. е. изменяются параметры, входящие в формулу (2). В силу различных механизмов эффект миграции влаги имеет место быть вне зоны интенсивного влагопереноса. Однако для решаемой задачи размещения капиллярного барьера (в пределах точности решения подобных задач) предлагаем ограничиться рассмотрением именно зоны интенсивного влагопереноса.

В общем виде зона интенсивного влагопереноса (по времени T) имеет вид, представленный на рис. 2 (заштрихована в границах, обозначенных сплошными линиями). В момент времени T_{fm} , соответствующий максимальной глубине сезонного промерзания, можно выделить нижнюю границу зоны интенсивного влагопереноса, соответствующую глубине относительно поверхности земляного полотна z_{ms} , и верхнюю границу, соответствующую глубине z_{me} . На глубинах z_{ms} и z_{me} соответственно начинается и заканчивается интенсивный влагоперенос в момент времени T_{fm} .

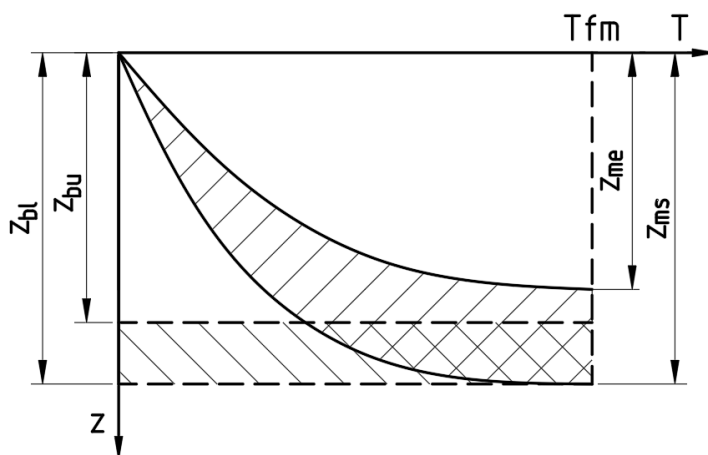


Рис. 2. Расположение капиллярного барьера относительно зоны интенсивного влагопереноса
Fig. 2. Capillary barrier arrangement relative to intensive moisture transfer

Принимая во внимание сформулированное условие перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера, а также необходимость расположения капиллярного барьера из непучинистого материала именно в зоне промерзания, можно записать условия для расположения капиллярного барьера следующим образом:

$$z_{bl} = z_{ms}, \quad (3)$$

$$z_{ms} > z_{bu} \geq z_{me}, \quad (4)$$

где z_{bl} – глубина нижней границы капиллярного барьера (рис. 2); z_{bu} – глубина верхней границы капиллярного барьера (рис. 2).

Расположение капиллярного барьера ниже зоны интенсивного влагопереноса приведет к перерасходу материалов выше нижней границы такой зоны: в лучшем случае к образованию области переувлажнения под капиллярным барьером, в худшем – к льдообразованию и пучению. Расположение капиллярного барьера выше верхней границы зоны интенсивного влагопереноса также будет приводить к перерасходу материалов, поскольку закрытая система промерзания уже будет обеспечена. Поэтому верхняя граница капиллярного барьера должна совпадать или находиться ниже верхней границы зоны интенсивного влагопереноса, а толщина капиллярного барьера h_6 будет зависеть от свойств его материала и, главным образом, от коэффициента влагопроводности h_1^6 .

Исходя из условий (3) и (4), максимальная толщина капиллярного барьера составляет

$$h_6^{\max} = z_{ms} - z_{me}. \quad (5)$$

Для определения границы зоны интенсивного влагопереноса, а соответственно, и границ расположения капиллярного барьера возможно использовать одно решение, предлагаемое рядом исследователей [7, 9, 13].

Расположение зоны интенсивного влагопереноса при промерзании

Это решение основано на привязке зоны интенсивного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве. На основании наблюдений за лабораторными и полевыми опытами [7, 9, 13, 14] установлено, что интенсивный влагоперенос наблюдается в интервале изотерм от 0 до -3 – -5 °C практически независимо от типа глинистого грунта. Еще в середине прошлого века были осуществлены эксперименты по миграции влаги в замерзающих глинистых грунтах под влиянием градиента температур с образованием прослоек льда. Обобщая результаты экспериментов, авторы в работе [13] показали, что большая часть потока влаги из талой зоны переносится внутри промерзающей зоны в пределах отрицательных температур от 0 до -4 °C. Более детально данный вопрос исследован в работе [7] на специально разработанных экспериментальных установках. С учетом S-образного характера кривой зависимости $W_n(t)$ содержания незамерзшей воды от температуры в работе [7] выделены три качественно различные температурные зоны для пылевато-глинистых грунтов. Среди этих зон наибольший интерес представляет зона интенсивных фазовых переходов, приуроченная к интервалу температур от $-0,6$ до -3 °C (рис. 3). Эта зона характеризуется диффузионно-пленочным механизмом влагопереноса и является зоной интенсивного влагопереноса. При температуре грунта ниже температуры начала замерзания $t_{нз}$, но не ниже $-0,6$ °C замерзание влаги не вызывает ее дефицита и, соответственно, движущей силы криогенной миграции. Температура от -3 °C и ниже соответствует наличию лишь осмотической, адсорбированной и химически связанной категорий воды, которая, согласно опытным данным [7],

практически не принимает участия в миграции. Конечно, миграция влаги возможна и при более низких температурах [15], но ее интенсивность крайне мала, и при рассмотрении решаемой задачи ее можно не учитывать.

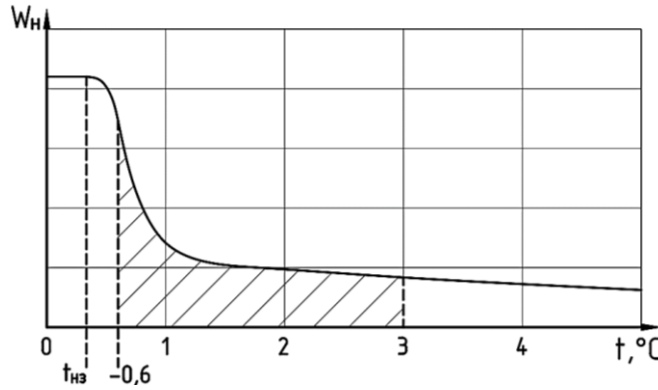


Рис. 3. Зона с диффузионно-пленочным механизмом влагопереноса на кривой зависимости содержания незамерзшей воды от температуры [7]

Fig. 3. Diffusion-film moisture transfer on the temperature curve of unfrozen water content

На основании представленных исследований глубины начала и окончания интенсивного влагопереноса возможно привязать к глубинам изотерм $-0,6$ ($t_{-0,6}$) и -3 °C ($t_{-3,0}$) соответственно, определенным в момент времени T_{fm} :

$$z_{ms} = z_{-0,6}; \quad z_{me} = z_{-3,0}. \quad (6)$$

Тогда (3) и (4) примут вид:

$$z_{bl} = z_{-0,6}, \quad (7)$$

$$z_{-0,6} > z_{bu} \geq z_{-3,0}. \quad (8)$$

При этом общий алгоритм решения задачи о расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна может иметь вид, представленный на рис. 4.

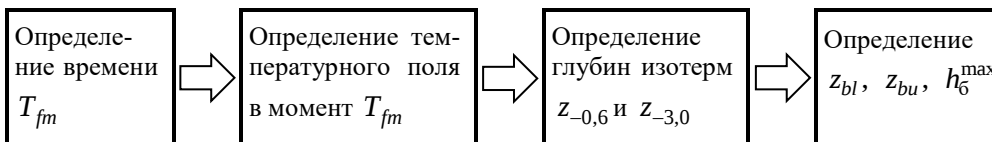


Рис. 4. Общий алгоритм решения задачи о расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна

Fig. 4. General algorithm of problem solution of capillary barrier arrangement in subgrade

Параметры, указанные в первых двух блоках алгоритма, определяются решением основного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье. Обобщая данные многолетних исследований [3, 8, 12], общее уравнение процесса промерзания-оттаивания для нестационарного теплового режима в трехмерном грунтовом пространстве можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{\lambda_{th,f}}{c_{th,f}\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + A, \quad (9)$$

в одномерной постановке

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{\lambda_{th,f}}{c_{th,f}\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + A, \quad (10)$$

где $C_{th,f}$ – удельная теплоемкость талых или мерзлых грунтов; ρ – плотность грунта; $\lambda_{th,f}$ – коэффициент теплопроводности талых или мерзлых грунтов; t – температура грунтов; T – время; A – функция, учитывающая различные концепции, механизмы и теории теплопереноса в грунтах, в том числе внутренние источники тепла [3, 8, 12].

Наряду с решением уравнений (9) и (10), определение времени T_{fm} , соответствующего максимальной глубине сезонного промерзания и температурного поля в конструкции в этот момент, возможно выполнять с использованием доступных и сертифицированных программных комплексов (Frost 3D, Freeze-1, Termoground), что значительно упрощает процесс расчетов и проектирования при решении прикладных инженерных задач.

Получив эпюру температурного поля в конструкции в момент времени T_{fm} (рис. 5), можно определить глубину изотерм $-0,6$ ($z_{-0,6}$) и -3°C ($z_{-3,0}$), а также глубину нижней z_{bl} и верхней z_{bu} границ капиллярного барьера и максимальную толщину капиллярного барьера $h_b^{\max}$ по (7), (8) и (5) соответственно.

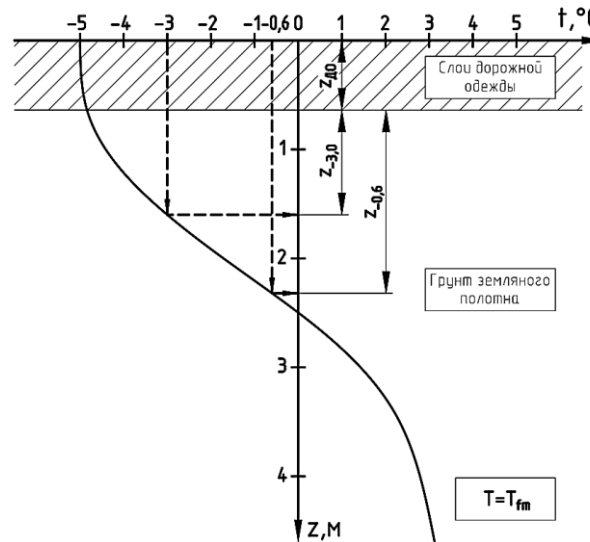


Рис. 5. Эпюра температурного поля (в одномерной постановке) в конструкции в момент максимального промерзания

Fig. 5. One-dimensional temperature curve at maximum freezing

Заключение

По результатам исследования сформулировано условие перевода открытой системы промерзания в закрытую и предложены критерии создания капиллярного барьера, формула (1).

Получено решение для определения максимальной толщины капиллярного барьера, формула (5). Для дальнейшего развития расчетной базы по определению деформаций морозного пучения при создании капиллярного барьера в земляном полотне путем инъектирования необходимо решить задачу обоснования расчетной толщины капиллярного барьера h_c , которая, согласно формуле (2), будет зависеть от коэффициента влагопроводности K_1^6 материала самого барьера. В дальнейших исследованиях необходимо установить зависимость данного параметра от числа пластичности глинистого грунта. При этом определение влагопроводности необходимо выполнить в условиях, приближенных к реальным, т. е. в процессе промерзания.

Задача о расположении (границах) капиллярного барьера в теле земляного полотна может быть решена по предлагаемым формулам (7), (8). Предложенные решения основаны на привязке зоны интенсивного криогенного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве грунта и, в свою очередь, методологически упрощают существующие подходы.

Для верификации полученных решений в будущих исследованиях необходимо:

- разработать методику лабораторного эксперимента с использованием прибора ГТ 1.1.12 для определения температуры (в том числе градиента температур) начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах;
- по разработанной методике провести серию экспериментов на образцах из супесей и суглинков с числом пластичности от 0,05 до 0,13;
- на основании экспериментальных данных уточнить изотермы начала интенсивного криогенного влагопереноса при выбранных параметрах эксперимента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Razuvaev D.A., Lanis A., Chakhlov M. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021. V. 13. № 5. P. 366–371. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21029
2. Razuvaev D.A., Chakhlov M.G., Soloviova V.Y., Karpachevsky G.V. Injection compositions for creating impervious screen for roadbed foundation // *Transportation Research Procedia*. 2022. V. 61. P. 621–626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.100>
3. Золотарь И.А., Пузаков Н.А., Сиденко В.М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Москва : Транспорт, 1971. 416 с.
4. Крицкий М.Я., Ланис А.Л. Усиление земляного полотна автомобильных дорог. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2013. 182 с.
5. Исаков А.Л., Бухов С.И. К оценке коэффициента морозного пучения глинистых грунтов земляного полотна при закрытой системе промерзания // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 1 (56). С. 92–98.
6. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Ленинград : Стройиздат, 1977. 184 с.

7. Чеверев В.Г. Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва, 1999. 305 с.
8. Кудрявцев В.А., Полтев Н.Ф., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г., Гарагуля Л.С. Мерзлотоведение / под ред. В.А. Кудрявцева. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1981. 240 с.
9. Пузаков Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Москва, 1960. 169 с.
10. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Москва : Стройиздат, 1963. 535 с.
11. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Усов Д.А. Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (58). С. 104–111. DOI 10.52170/1815-9265_2021_58_104
12. Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчеты). Санкт-Петербург, 2014. 262 с.
13. Кудрявцев В.А., Достовалов Б.Н., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Общее мерзлотоведение (геокриология) / под ред. В.А. Кудрявцева. Москва : Изд-во МГУ, 1978. 464 с.
14. Ананян А.А. Исследование процессов перемещения влаги и образование сегрегационного льда в замерзающих и мерзлых горных породах // Труды Гидропроекта. Сб. 3. Москва, 1960.
15. Чистотинов Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. Москва : Наука, 1973. 142 с.

REFERENCES

1. Razuvaev D.A., Lanis A.L., Chakhlov M.G. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021; 13: 366–371.
2. Razuvaev D.A., Chakhlov M.G., Soloviova V.Y., Karpachevsky G.V. Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation. *Transportation Research Procedia*. 2022; 61: 621–626.
3. Zolotar' I.A., Puzakov N.A., Sidenko V.M. Water thermal conditions of subgrade and pavement. Moscow: Transport, 1971. 416 p. (In Russian)
4. Kritskiy Ya.M., Lanis A.L. Subgrade strengthening. Novosibirsk, 2013. 182 p. (In Russian)
5. Isakov A.L., Bukhov S.I. Assessment of frost heaving coefficient of clayey subgrade soils with closed-freezing system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2021; 1 (56): 92–98. (In Russian)
6. Orlov V.O., Dubnov Yu.D., Merenkov N.D. Freezing soil heaving and its effect on structure foundations. Saint-Petersburg: Stroiizdat, 1977. 184 p. (In Russian)
7. Cheverev V.G. Physicochemical theory of mass transfer and thermal properties of cryogenic soils. Moscow, 1999. 305 p. (In Russian)
8. Poltev N.F., Romanovskiy N.N., Kondrat'yeva K.A., Melamed V.G., Garagulya L.S., Kudryavtsev V.A. (Ed.) Permafrost. Moscow, 1981. 240 p. (In Russian)
9. Puzakov N.A. Water thermal conditions of subgrades. Moscow: Avtotransizdat, 1960. 169 p. (In Russian)
10. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. Theory of heat and mass transfer. Moscow: Stroiizdat, 1963. 220 p. (In Russian)
11. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Usov D.A. Influence of seasonal thawing of frozen soils on subgrade deformation. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2021; 3 (58): 104–111. (In Russian)
12. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element analysis. Saint-Petersburg: Georekonstruktsiya, 2014. 262 p. (In Russian)
13. Dostovalov B.N., Romanovskiy N.N., Kondrat'yeva K.A., Melamed V.G., Kudryavtsev V.A. (Ed.) General permafrost studies (geocryology). Moscow: MGU, 1978. 464 p. (In Russian)

14. Ananyan A.A. Moisture transfer and formation of segregated ice in freezing and frozen rocks. Trudy Gidroproekta 3. 1960. 115 p. (In Russian)
15. Chistotinov L.V. Moisture transfer in frozen non-saturated soils. Moscow: Nauka, 1973. 142 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Разуваев Денис Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, razdenis@mail.ru

Чахлов Михаил Геннадьевич, аспирант, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, mik404@mail.ru

Authors Details

Denis A. Razuvaev, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, razdenis@mail.ru

Mikhail G. Chakhlov, Research Assistant, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, mik404@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 02.12.2022
Одобрена после рецензирования 17.04.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 02.12.2022
Approved after review 17.04.2023
Accepted for publication 16.05.2023