

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры строительной механики ТГАСУ, г. Томск; lls@tsuab.ru
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ректор МГСУ, г. Москва; pavel.akimov@gmail.com
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО, г. Москва; amb@stadyo.ru
Беккер А.Т., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, научный руководитель политехнического института ДВФУ, г. Владивосток; bekker.at@dvfu.ru
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России, г. Москва; niitag@yandex.ru
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, советник РААСН, ректор ТГАСУ, г. Томск; rector@tsuab.ru
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ, г. Томск; vgg-tomsk@mail.ru
Волокитин О.Г., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, проректор по 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@ipu.ru
Люсия Тсантисис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; lucia.tsanilis@polito.it
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург; morozov@spbgasu.ru
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ, советник РААСН, г. Томск; ovssn@tsuab.ru
Орозбеков М.О., докт. техн. наук, профессор ОмГУ, г. Омск, Кыргызская Республика; oshsu@mail.ru
Поляков Е.Н., докт. искусствоведения, канд. архитектуры, профессор кафедры теории и истории архитектуры ТГАСУ, член Союза архитекторов России, г. Томск; polyakov-en@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 № 4 – 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 23.08.2023. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 16,58. Усл. печ. л. 19,69. Тираж 200 экз.
Зак. № 55.

Дата выхода: 28.08.2023.
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

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL
OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 25

№ 4 2023
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

[illegible]

EDITORIAL STAFF

Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Structural Mechanics Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; lls@tsuab.ru
Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS, Rector, MGSU, Moscow, Russia; pavel.akimov@gmail.com
Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Director General Research Center StaDiO, Moscow, Russia; amb@stadyo.ru
Bekker A.T., DSc, Professor, RAACS Academician, Academic Adviser, Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; becker.at@dvfu.ru
Bondarenko I.A., DSc, Professor, RAACS Academician, Director Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, Branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia; niitag@yandex.ru
Chupin V.R., DSc, Professor, Head of Urban Planning and Economy Dept., National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia; chupinvr@ex.istu.edu
Degtyarev V.V., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; ngasu_gts@mail.ru
Efimenko V.N., DSc, Professor, Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; svefimenko_80@mail.ru
Efimenko S.V., DSc, 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_gasu@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; bagdatbt@yahoo.com
Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician, Moscow, Russia; travush@mail.ru
Tsantilis L., A/Professor, Environment, Land and Infrastructure Engineering Dept., Polytechnic University of Turin, Turin, Italy; lucia.tsantilis@polito.it
Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; nac@tsuab.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.toms.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 4 – 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: 23.08.2023. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 28.08.2023.
Published sheets: 16,58. Conventional printed sheets: 19,69. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 55.

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

Прислонова Д.В., Ситникова Е.В. Анализ архитектурно-пространственной структуры квартала исторического центра г. Ачинска (ТГАСУ, г. Томск)	9
Артемова Е.А. Когнитивно-поведенческая урбанистика: критерии и принципы формирования адаптивной городской среды (ООО «Ресайклинг Констракшн», г. Воронеж)	27
Пылов П.А., Дягилева А.В., Николаева Е.А., Шалыгина Т.А. Разработка интеллектуальной модели для автоматизированного определения стиля архитектуры здания (КузГТУ, г. Кемерово, ТГАСУ, г. Томск)	38
Ермолина А.М. Особенности трансформации городских кварталов Кемерово от момента основания города в 1918 году до настоящего времени (СевГУ, г. Севастополь)	45
Исмагилова С.Х., Горшкова Е.Д., Залетова Е.А. Развитие инфраструктуры микромобильности в городе Казани (КГАСУ, ФПД РТ, г. Казань)	57
Кутуков А.А., Колокольцева Е.Н., Романова Л.С. Инженерные вопросы реставрации. Защита исторических зданий от негативного воздействия окружающей среды (ТГАСУ, г. Томск)	71
Рубанова М.И. Концептуальные основы проектирования досугового студенческого центра ТГАСУ в г. Томске (ТГАСУ, г. Томск)	84

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Конин Д.В. Напряжения и сдвиг сталежелезобетонных перекрытий со сборными элементами и стальными балками (АО «НИЦ Строительство», г. Москва)	98
Тарасов Д.А. Оптимизация геометрических характеристик сечения изгибно-жесткой нити на основе энергетического критерия (ПГУ, г. Пенза)	116

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Крутилин А.А., Крапчцова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Влияние однородности химико-минералогического состава сырьевых смесей на прочностные характеристики портландцементного клинкера (Себряковский филиал ВолгГТУ, АО «Себряковцемент», г. Михайловка)	129
Мананков А.В., Яковлев В.М., Локтюшин А.А., Горюхин Е.Я. Новые возможности многофункциональных материалов (НИ ТГУ, ТГАСУ, ТКЭ, г. Томск)	143

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Непомнящев Г.А., Титов М.М. Повышение прочностных показателей цементного камня комплексным электрофизическим воздействием на водоцементную суспензию (НГАСУ, г. Новосибирск)	161
---	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Юшубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А., Бурмин А.В., Устюжанин В.Л. Влияние неравномерных перемещений бутового фундамента на несущую способность кирпичных стен здания исторической застройки (ТГАСУ, г. Томск).....	176
Юшубе С.В., Тарасов А.А., Устюгов А.С. Анализ значений усилия вдавливания свай, полученных экспериментальным путем, в сравнении с результатами расчетов, выполненных по методикам нормативных документов (ТГАСУ, г. Томск)	189

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

Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. О надежности штамповых испытаний по грунту при возведении свайного фундамента опор мостов (ООО «ДИАМОС», ТГАСУ, г. Томск).....	199
Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения (НИИ ТСК, МАДИ, г. Москва)	211

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Prislonova D.V., Sitnikova E.V. Architectural and spatial structure of the historical center in Achinsk (Tomsk).....	9
Artemova E.A. Cognitive-behavioral urban planning: Criteria and principles of adaptive urban environment (Voronezh).....	27
Pylov P.A., Dyagileva A.V., Nikolaeva E.A., Shalygina T.A. Intelligent model for automated identification of architectural style (Kemerovo, Tomsk)	38
Ermolina A.M. Transformation of city blocks in Kemerovo from 1918 until the present (Sevastopol).....	45
Ismagilova S.Kh., Gorshkova E.D., Zaletova E.A. Development of micromobility infrastructure in Kazan (Kazan).....	57
Kutukov A.A., Kolokol'tseva E.N., Romanova L.S. Engineering problems of restoration. Protection of historic buildings from negative environmental impact (Tomsk).....	71
Rubanova M.I. Design principles of leisure student hub in Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk).....	84

BUILDING AND CONSTRUCTION

Konin D.V. Stress and shear of steel reinforced floors with prefabricated units and steel beams (Moscow)	98
Tarasov D.A. Cross-section geometry optimization of flexural thread using energy criterion (Penza).....	116

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K. The influence of homogeneity of chemical and mineralogical composition of raw mixes on strength properties of Portland clinker (Mikhailovka)	129
Manankov A.V., Yakovlev V.M., Loktyushin A.A., Goryukhin E.Ya. New opportunities of multifunctional materials (Tomsk)	143

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Nepomnyashchev G.A., Titov M.M. Increasing cement strength properties with electrophysical processing of water-cement suspension (Novosibirsk).....	161
--	-----

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A., Burmin A.V., Ustyuzhanin V.L. The influence of nonuniform movement of rubble foundation on bearing capacity of brick walls of a historic building (Tomsk)	176
Yushchube S.V., Tarasov A.A., Ustyugov A.S. Comparison of experimental pile penetration force and calculated by regulatory documents (Tomsk).....	189

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

Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V., Alekseev A.A. Reliability of plate-bearing tests of pile foundations for bridge abutments (Tomsk)	199
Gorskii M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E. Temperature effect on flexural bowl determined by falling weight deflectometer testing (Moscow)	211

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 9–26.

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 (4): 9–26.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.035

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-9-26

EDN: GAZSIO

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ КВАРТАЛА ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА Г. АЧИНСКА

Дарья Валерьевна Прислонова, Елена Владимировна Ситникова
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. В статье рассматривается застройка квартала, расположенного в историческом ядре г. Ачинска. Застройка представляет собой локальный исторический комплекс, сформированный тремя крупными домовладениями – усадьбами купцов Максимова, Бородавкина и Мокроусова.

Актуальность темы исследования определяется низкой степенью изученности вопросов формирования архитектурного облика г. Ачинска, а также истории возведения объектов исторической застройки с одновременно существующей проблемой их физической утраты.

Целью исследования является изучение архитектурно-градостроительного фрагмента исторической застройки Ачинска для выявления характерных особенностей пространственно-планировочной и функциональной организации города, определение архитектурно-стилистических приемов и качеств зданий, установление степени влияния отдельной социальной группы на формирование архитектурной среды города.

Научная новизна исследования состоит в комплексном историко-архитектурном анализе застройки квартала исторического центра г. Ачинска в границах улиц Ленина, Дзержинского, Пузановой, Комсомольской; во введении в научный оборот ранее неопубликованных архивных данных и исторических иконографических материалов; в фиксации актуального состояния исторического комплекса.

Использованы **методы** натурного исследования, комплексного, системного и сравнительного анализа информации.

Научной базой статьи являются материалы историко-архивных, библиографических и натурных исследований.

Ключевые слова: Ачинск, Максимов, Бородавкин, Мокроусов, купеческая усадьба, купечество, архитектурное наследие, историко-градостроительная среда, исторический квартал

Для цитирования: Прислонова Д.В., Ситникова Е.В. Анализ архитектурно-пространственной структуры квартала исторического центра г. Ачинска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 9–26. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-9-26 EDN: GAZSIO

ORIGINAL ARTICLE

ARCHITECTURAL AND SPATIAL STRUCTURE OF THE HISTORICAL CENTER IN ACHINSK

Darya V. Prislouova, Elena V. Sitnikova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The article considers the development of the historical center in the city of Achinsk formed by three large households, namely estates of merchants Maximov, Borodavkin and Mokrousov. The relevance of the topic is determined by limited knowledge of the Achinsk architecture and the history of building construction.

Purpose: The aim of this work is to study the architectural and urban planning of the historical center in Achinsk to identify the spatial planning and functional organization of the city, determine the architectural style of buildings, identify the influence of a separate social group on the architectural environment.

Methodology/approach: A comprehensive historical and architectural analysis of the historical center in Achinsk framed by Lenin, Dzerzhinsky, Puzanova, Komsomolskaya streets; scientific circulation of previously unpublished archival data and historical iconographic materials; description of the current state of the historical center. Archival materials, bibliographic and field studies.

Keywords: Achinsk, Maksimov, Borodavkin, Mokrousov, merchant estate, merchants, architectural heritage, historical and urban environment

For citation: Prislouova D.V., Sitnikova E.V. Architectural and spatial structure of the historical center in Achinsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 9–26. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-9-26. EDN: GAZSIO

Ачинск является третьим по численности городом в Красноярском крае, обладающим высоким историко-культурным потенциалом. В современной структуре города сохранились целостные фрагменты историко-архитектурной среды, отражающие основные этапы формирования, коннотативные смыслы и важные эпизоды истории города и региона. До 2010 г. Ачинск официально входил в перечень поселений, имеющих историческую и культурную ценность всероссийского значения.

В настоящее время территория исторического центра города потеряла свое социально-культурное и функциональное значение городского ядра, что способствовало обесцениванию расположенной здесь исторической застройки. Отчасти это спасло среду от современных негативных трансформаций

и внедрений, позволило сохранить ее в практически целостном и подлинном виде. В то же время такая ситуация сформировала негативные эксплуатационные условия: выведение общественно-административных учреждений, пренебрежительное отношение, запустение, изолированность, что привело к упадку и постепенному разрушению объектов исторической архитектуры. Существующая угроза утраты индивидуальности, самоидентичности и местного колорита Ачинска требует принятия срочных мер по сохранению исторического наследия, которые должны начинаться с комплексного исследования историко-архитектурной среды и формирования интереса и понимания значимости культурного достояния у местного населения.

Подробный исторический и социально-экономический анализ от основания до становления и укрепления г. Ачинска как поселения приведен в работе Д.Я. Резуна «Русские в среднем Причулымье в XVII–XIX вв. (Проблемы социально-экономического развития малых городов Сибири)» [1]. Летопись Ачинска в контексте градостроительного освоения и развития приводится в монографиях В.И. Царева и Ю.И. Гринберга [2], В.Т. Горбачёва, Н.Н. Крадина, Н.П. Крадина, В.И. Крушлинского, Т.М. Степанской, В.И. Царёва [3]. На основании данных работ можно проследить основные этапы формирования города.

Научные статьи об отдельных объектах архитектуры Ачинска написаны исследователями Д.В. Прислоновой и И.Ю. Болтовской [4, 5, 6]. Анализ влияния купечества на формирование архитектурного облика города затронут в статьях Д.В. Прислоновой, Е.В. Ситниковой [7], В.П. Бойко [8].

Краткая историко-биографическая характеристика ачинского купечества и его представителей приводится в монографии, написанной авторским коллективом: Г.Ф. Быконя, Е.В. Комлева, А.И. Погребняк [9] и в работе А.И. Погребняка [10].

Приведенные выше материалы совместно с выявленными архивными документами послужили основой для настоящей научной статьи. Трудность исследования объектов исторической архитектурно-градостроительной среды во многом заключается в ограниченном количестве сохранившейся архивной информации.

Целью исследования стало изучение архитектурно-градостроительного фрагмента исторической застройки Ачинска для выявления характерных особенностей пространственно-планировочной и функциональной организации города, определение архитектурно-стилистических приемов и качеств зданий, установление степени влияния отдельной социальной группы на формирование архитектурной среды города.

Научная новизна исследования состоит, во-первых, в комплексном историко-архитектурном анализе застройки квартала исторического центра г. Ачинска в границах улиц Ленина, Дзержинского, Пузановой, Комсомольской; во-вторых, во введении в научный оборот ранее неопубликованных архивных данных и исторических иконографических материалов; в третьих, в фиксации актуального состояния исторического комплекса.

Представленная статья написана в рамках работы над кандидатской диссертацией, посвященной исследованию влияния купеческого сословия на формирование архитектурного облика городов Красноярского края.

Исследуемый квартал расположен в историческом ядре г. Ачинска и ограничен улицами Ленина (ранее ул. Никольская), Пузановой (ранее ул. Береговая), Дзержинского (ранее пер. Инокентьевский) и Комсомольской (ранее пер. Садовый). Застройка квартала представляет собой локальный исторический комплекс, сформированный тремя крупными домовладениями – усадьбами купцов Максимова, Бородавкина и Мокроусова (табл. 1).

Таблица 1

Экспликация сохранившихся объектов исторических домовладений

Table 1

Explication of preserved historical households

I. Усадьба Мокроусовых	II. Усадьба И.Б. Бородавкина	III. Усадьба Максимовых
1. Двухэтажный каменный жилой дом (ул. Ленина, 20) 2. Одноэтажное каменное здание (предположительно магазин) (ул. Ленина, 20а) 3. Одноэтажный каменный магазин (ул. Ленина, 20г) 4. Двухэтажное каменное здание кладовых (ул. Пузановой, 19)	1. Полукаменный двухэтажный жилой дом (ул. Ленина, 22) 2. Каменный одноэтажный магазин (ул. Ленина, 22а) 3. Складской корпус (ул. Ленина, 22а) 4. Корпус одноэтажных каменных кладовых (ул. Пузановой, 21, к. 1) 5. Корпус одноэтажных каменных кладовых (ул. Пузановой, 21) 6. Корпус одноэтажных каменных кладовых (ул. Пузановой, 21) 7. Корпус одноэтажных каменных кладовых (ул. Пузановой, 21)	1. Дом каменный двухэтажный (ул. Ленина, 24) 2. Каменный магазин (ул. Ленина, 24а) 3. Каменный магазин (ул. Ленина, 24г) 4. Каменное складское помещение (ул. Ленина, 24а) 5. Каменные кладовые (ул. Ленина, 24а)

Для купеческих усадеб Ачинска свойственно объединение жилой и торговой функций. Крупных торговых домов в городе не было, однако их отсутствие компенсировалось множеством торговых лавок и магазинов. Данная особенность прослеживается при анализе объемно-пространственной структуры рассматриваемого квартала, где отражаются характерные черты архитектурно-градостроительной индивидуальности города.

Границы домовладений определены по архивным материалам: страховым ведомостям (1903–1905 гг. [11] и 1913–1915 гг. [12]) и списку домовладельцев за 1917 г. [13]. Кроме того, определение границ стало возможно благодаря высокой степени сохранности исторической опорной застройки усадеб. Согласно данным материалам, усадьба купцов Мокроусовых выходила на ул. Никольскую (совр. ул. Ленина), пер. Инокентьевский (совр. ул. Дзержинского) и ул. Береговую (совр. ул. Пузановой), а в глубину граница доходила практически до середины квартала. Центральным участком квартала к концу XIX в. владел купец И.Б. Бородавкин. Объекты усадьбы выходили на линии застройки ул. Никольской (совр. ул. Ленина) и ул. Береговой (совр. ул. Пузановой). Границы территории домовладения купца Г.Н. Максимова претерпевали трансформацию и к 1915 г. фактически фиксировали угол перекрёстка ул. Никольской (совр. ул. Ленина) и пер. Садового (совр. ул. Комсомольская) (рис. 1, табл. 2).

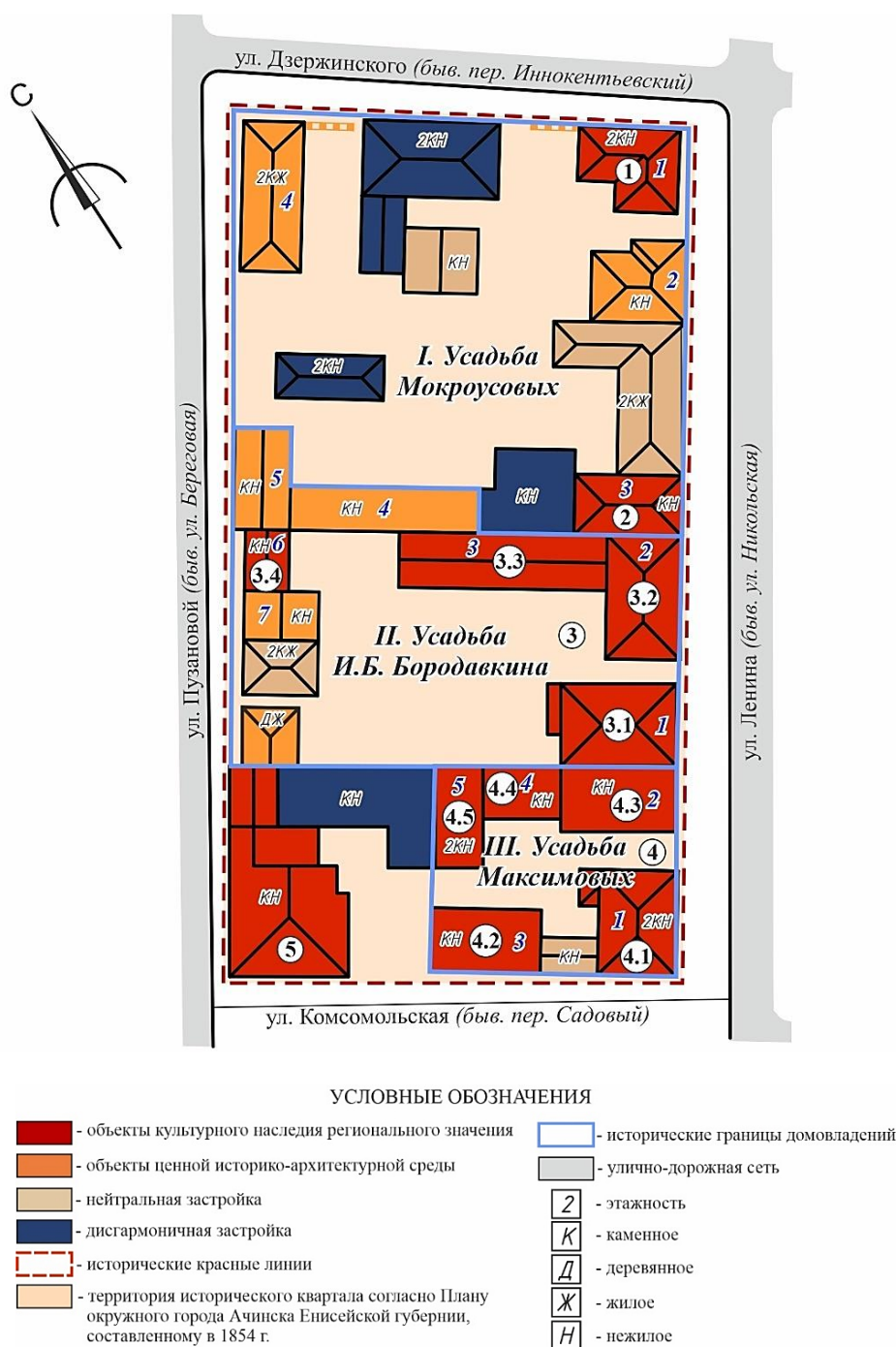


Рис. 1. Историко-культурный опорный план в границах улиц Ленина, Дзержинского, Пузановой, Комсомольской. Составлен Д.В. Прислоновой, 2022 г.

Fig. 1. Historical and cultural reference plan within the boundaries of Lenin, Dzerzhinsky, Puzanova, Komsomolskaya streets. Compiled by D.V. Prislonoa, 2022

Таблица 2

Экспликация объектов культурного наследия

Table 2

Explication of cultural heritage objects

Номер экспликации	Наименование объекта культурного наследия	Дата строительства	Адрес	Вид объекта/Видовая принадлежность
Объекты культурного наследия регионального значения				
1	Дом, в котором в январе 1920 г. находился штаб партизанской армии Щетинкина-Кравченко	1890 г.	ул. Ленина, 20	Памятник/Памятник истории
2	Магазин	сер. XIX в.	ул. Ленина, 20г	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
3	Усадьба Бородавкина	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 22, 22а	Ансамбль/Памятник градостроительства и архитектуры
3.1	Жилой дом с магазином (кирпич, дерево)	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 22	Ансамбль/Памятник градостроительства и архитектуры
3.2	Здание магазина	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 22 А	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
3.3	Конторско-складской корпус	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 22	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
3.4	Амбар	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 22	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
4	Усадьба Максимова	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 24, 24а, 24б, 24г	Ансамбль/Памятник градостроительства и архитектуры
4.1	Дом жилой	конец XIX в.	ул. Ленина, 24	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
4.2	Флигель	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 24г	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
4.3	Лавка	конец XIX в.	ул. Ленина, 24а	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
4.4	Завозня	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 24а	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры

Окончание табл. 2
End of table

Номер экспликации	Наименование объекта культурного наследия	Дата строительства	Адрес	Вид объекта/Видовая принадлежность
Объекты культурного наследия регионального значения				
4.5	Канторско-складской корпус	кон. XIX – нач. XX в.	ул. Ленина, 246	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры
5	Синематограф	1913 г.	ул. Комсомольская, 1	Памятник/Памятник градостроительства и архитектуры

Наиболее крупным участком владела семья купцов Мокроусовых. Известны имена двух представителей купеческого семейства – это Семен Ефремович и его сын Андрей Семенович.

Семен Ефремович входил во вторую купеческую гильдию. Занимался торговлей бакалейными, галантерейными и другими товарами. Андрей Семенович состоял во второй гильдии, впоследствии перешел в первую. Торговал в Ачинске разными товарами, образовал предприятие по добыче руды «А.С. Мокроусов и К». В 1912 г. «за энергичное содействие к проведению железнодорожной линии от Минусинска в Ачинск и полезную общественную деятельность» [9, с. 206] Андрею Семеновичу было присвоено звание почетного гражданина г. Ачинска.

Первые сведения о домовладении встречаются в журнале торговых и промышленных заведений по г. Ачинску за 1882 г., где указано, что Семену Ефремовичу принадлежала торговая лавка, размещавшаяся в собственном доме, и раменский погреб [14] (табл. 3).

К сведениям последующего этапа относится информация из архивного дела о постройке каменного дома купцом С.Е. Мокроусовым в Ачинске, из которого можно установить точную дату строительства главного жилого дома и его авторство. В деле содержится письмо купца с отчетом о завершении строительства от 14 мая 1891 г.: «...постройка моего каменного дома совершенно уже окончена еще в августе месяце прошлого года (1890 г. – прим. авт.), что дом этот выстроен по плану Томским Губернским Архитектором Хабаровым, а постройка его производилась с разрешения Городской Управы» [15].

По материалам страховых ведомостей городских строений по г. Ачинску за 1901–1903 и за 1913–1915 гг. возможно установить состав домовладения и характер изменений на начало XX в. По данным 1901–1903 гг. купцу Семену Ефремович Мокроусову принадлежали постройки по ул. Никольской (совр. ул. Ленина): «Дом каменный двухэтажный, крытый железом. Каменный магазин, крытый железом, двухэтажные каменные кладовые, крытые железом. Флигель деревянный, крытый железом на четыре ската. А также три деревянных амбара, крытых железом, и каменная баня, крытая железом» [11].

К 1913 г. расширился хозяйственный блок усадьбы. В ведомостях к уже описанному составу добавились деревянные амбар, завозня, навес и конюшня.

Таблица 3

**Выписка из журнала торговых и промышленных заведений
по г. Ачинску за 1882 г.**

Table 3

**Extract from the Journal of Commercial and Industrial Enterprises
of Achinsk, 1882**

Какое заведение и где находится	Кому принадлежит заведение	Заметка о свойстве и размере торговли	Откуда получается товар
Лавка с бакалейными, галантерейными и мелочными товарами, в собственном доме	Ачинскому 2 гильдии купцу Семену Ефремовичу Мокроусову	Розничная торговля бакалейными, галантерейными и мелочными товарами, стеклянной посудой внутреннего производства. Заведение состоит из одного покоя с одним наружным входом. Кроме четырех приказчиков других служащих нет. Годовой оборот около 100 000 руб., чистой прибыли около 10 000 руб.	Товары получают от разных лиц из Москвы, Нижегородской и Ирбетской ярмарок
Раменский погреб, в том же помещении	Тому же купцу Мокроусову	Продажа разного рода водок, иностранных вин, пива. Погреб занимает часть лавки. Кроме одного приказчика других служащих не имеет. Годовой оборот 3000 руб., чистой прибыли 300 руб.	Вина получают от Елисеевых из С.-Петербурга и Трусова в Тюмени

При натурном обследовании усадьбы установлено, что на территории бывшего домовладения сохранились следующие исторические объекты: двухэтажный каменный жилой дом (ул. Ленина, 20) (рис. 2, 3), одноэтажное каменное здание (предположительно магазин) (ул. Ленина, 20а) (рис. 4), одноэтажный каменный магазин (ул. Ленина, 20г) (рис. 5), двухэтажное каменное здание кладовых (ул. Пузановой, 19). Также по ул. Дзержинского сохранились фрагменты каменного ограждения. Объекты обладают высокой степенью сохранности исторического архитектурного облика.

Объектами культурного наследия из представленных построек являются: жилой дом (рис. 3) «Дом, в котором в январе 1920 г. находился штаб партизанской армии Щетинкина-Кравченко» (ул. Ленина, 20) и «Магазин» (рис. 4) постройки сер. XIX в. (ул. Ленина, 20г) (рис. 1, табл. 2).

Особый интерес представляет каменное двухэтажное здание бывшего жилого дома усадьбы. Объект располагается на перекрестке ул. Никольской (совр. ул. Ленина) и пер. Иннокентьевского (совр. ул. Дзержинского) и явля-

ется ярким образцом «кирпичного стиля». Главные фасады дома симметричны и имеют трехчастную структуру. Боковые части уличных фасадов представляют собой ризалиты с увеличенной высотой за счет каменного парапета в виде чередующегося ряда глухих и сквозных арок. Фасад по ул. Ленина выполнен в семь осей оконных проемов лучкового завершения. По центральной оси в уровне второго этажа расположен балкон на сдвоенных кованых кронштейнах с кованым ограждением. Фасад по ул. Дзержинского также имеет семь осей оконных проемов. По центральной оси окна глухие. Фасады здания богато декорированы. Ныне в здании располагается Ачинский краеведческий музей им. Д.С. Каргаполова (рис. 3).



Рис. 2. Жилой дом усадьбы купца С.Е. Мокроусова. Фото начала XX в. [19]

Fig. 2. Residential building of the Mokrousov's estate. The 20th century [19]



Рис. 3. Жилой дом усадьбы купца С.Е. Мокроусова. Объект культурного наследия регионального значения. Фото Д.В. Прислоновой, июль 2022 г.

Fig. 3. Residential building of the Mokrousov's estate, the object of cultural heritage of regional significance. Photograph by D.V. Prislonova, July 2022



Рис. 4. Здание магазина купца С.Е. Мокроусова. Объект культурного наследия регионального значения «Магазин», сер. XIX в. (ул. Ленина, 20г). Фото Д.В. Прислоновой, май 2022 г.

Fig. 4. The Mokrousov's shop, the cultural heritage of regional significance, 19th century. Photograph by D.V. Prislonova, May 2022



Рис. 5. Торговое здание бывшей усадьбы купца С.Е. Мокроусова. Объект ценной историко-архитектурной среды. Фото Д.В. Прислоновой, июль 2022 г.

Fig. 5. The Mokrousov's commercial building, the historical and architectural heritage. Photograph by D.V. Prislonova, July 2022

Следующее домовладение принадлежало ачинскому купцу второй гильдии Иуде Борисовичу Бородавкину, сосланному на поселение в Ачинск за мошенничество. Свою деятельность в Ачинске он начал в качестве приказчика в магазине купцов Гадаловых. Впоследствии Бородавкин выкупил магазин и земельный участок, где и выстроил свою усадьбу.

По данным страховых ведомостей городских строений по городу Ачинску за 1901–1903 гг., И.Б. Бородавкину на рубеже XIX–XX столетий принадлежало: «Дом деревянный одноэтажный, крытый железом на два ската. Завозня деревянная, крытая железом на один скат. Каменный магазин с подвалом, крытый железом» [11]. Представленные сведения фактически свидетельствуют о составе усадьбы на момент приобретения ее у купцов Гадаловых.

К 1913–1915 гг. домовладение Бородавкина существенно изменилось. В его составе числились: «Дом полукаменный 2-этажный, 8-стенный, крытый железом на 4 ската. Каменный магазин 4-стенный с подвалом, крытый железом на 4 ската. Каменная кладовая, крытая железом на 2 ската. Также каменная кладовая, крытая железом» [12]. Главный жилой дом усадьбы датируется 1907 г. Автор проекта здания неизвестен, однако в библиографических источниках указано, что здание возведено «по образцу томских домов рубежа XIX–XX вв. Томские мастера делали “на вывоз” резной декор, а торговые связи между Ачинском и Томском были еще тесными и постоянными» [16, с. 23].

В материалах архивного дела по национализации домовладения купца Бородавкина за 1922 г. представлено описание состава усадьбы и входящих в нее объектов. На основании этих сведений можно проследить увеличение пообъектного состава. В период с 1915 по 1918 г. были выстроены: каменная пристройка к магазину (склад), каменная кладовая, конюшня на пять отделений, конюшня на три отделения, конюшня на два отделения, сеновал, навес и дровяник [17].

При сопоставлении сведений, полученных в результате натурного обследования усадьбы, с архивными данными установлено, что на момент проведения исследования к сохранившимся историческим объектам относятся: полукаменный двухэтажный жилой дом (ул. Ленина, 22), каменный одноэтажный магазин (ул. Ленина, 22а), складской корпус (ул. Ленина, 22а), три корпуса одноэтажных каменных кладовых (ул. Пузановой, 21 и 21, к. 1) (рис. 6–8).

Усадьба Бородавкина является объектом культурного наследия регионального значения – ансамблем «Усадьба Бородавкина, кон. XIX – нач. XX в.» и включает в свой состав объекты культурного наследия – памятники: «Жилой дом с магазином» (ул. Ленина, 22), «Здание магазина» (ул. Ленина, 22а), «Конторско-складской корпус» (ул. Ленина, 22) и «Амбар» (ул. Ленина, 22) (см. рис. 1, табл. 2). В состав ансамбля усадьбы включены не все сохранившиеся исторически здания.

Архитектурно-стилистическое решение главного двухэтажного полукаменного жилого дома усадьбы соответствует формам эклектики (рис. 9). Главный фасад, выходящий на ул. Никольскую (совр. ул. Ленина), имеет шестиступенчатую композицию. Все окна имеют лучковое завершение. На фасаде по линии третьей оси располагается парадный вход. Дверной проем и окно по четверной оси обрамлены пилястрами. Центральный фрагмент, в уровне первого этажа, является ризалитом. Первый каменный этаж отделяется от второ-

го, деревянного, высоким ступенчатым междуэтажным карнизом. Первый этаж оштукатурен, второй этаж обшит. Окна второго этажа имеют обрамления в виде наличников, богато украшенных резьбой растительного орнамента. Над линией окон протянут резной фриз. Углы в уровне второго этажа закрыты тонкими пилястрами с фигурными полуколоннами. Завершается объем карнизом большого выноса, поддерживаемого резными кронштейнами. Плоскость между кронштейнами декорирована резными накладками.

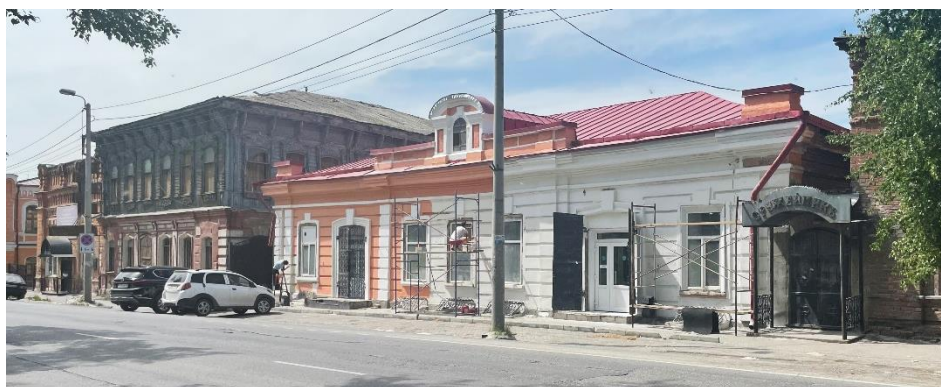


Рис. 6. Вид усадьбы купца И.Б. Бородавкина с ул. Ленина. Объект культурного наследия регионального значения – ансамбль «Усадьба Бородавкина, кон. XIX – нач. XX в.». Фото Д.В. Прислоновой, июль 2022 г.

Fig. 6. Borodavkin's estate, Lenin Street, the cultural heritage of regional significance, 19th–20th centuries. Photograph by D.V. Prislionova, July 2022



Рис. 7. Здание кладовых усадьбы купца И.Б. Бородавкина. Объект культурного наследия регионального значения «Конторско-складской корпус» (ул. Ленина, 22). Фото Д.В. Прислоновой, июль 2022 г.

Fig. 7. Borodavkin's estate, Lenin Street, the cultural heritage of regional importance. Photograph by D.V. Prislionova, July 2022



Рис. 8. Корпус кладовых усадьбы купца И.Б. Бородавкина по ул. Пузановой. Объект ценной историко-архитектурной среды. Фото Д.В. Прислоновой, июль 2022 г.

Fig. 8. Borodavkin's estate, Puzanov Street, the valuable historical and architectural heritage. Photograph by D.V. Prislionova, July 2022

На период проведения исследования здание бывшего жилого дома не эксплуатировалось, в здании бывшего магазина размещается коммерческое учреждение.



Рис. 9. Жилой дом с магазином усадьбы купца И.Б. Бородавкина. Объект культурного наследия регионального значения «Жилой дом с магазином» (ул. Ленина, 22). Фото Д.В. Прислоновой, июль 2022 г.

Fig. 9. Borodavkin's residential house, Lenin Street, the cultural heritage of regional importance. Photograph by D.V. Prislónova, July 2022

Третий крупный участок квартала занимала усадьба купеческой семьи Максимовых. Самым известным представителем семейства был купец Григорий Николаевич Максимов, входивший в 1885 г. во вторую гильдию, а с 1900 г. – в первую. Начиная будущий купец «с мелочной торговли в лавке, впоследствии стал крупнейшим в городе и уезде купцом-первогильдейцем с капиталом более 50 тыс. рублей, с 1887 – личным почетным гражданином, с 1907 – потомственным почетным гражданином» [9, с. 197].

Г.Н. Максимов служил гласным Ачинской городской думы, дважды избирался городским головой Ачинска (октябрь 1883 – июль 1886 г.; январь 1889 – апрель 1892 г.), более 20 лет являлся церковным старостой Троицкого собора, был почетным смотрителем Ачинского городского трехклассного училища (1890), председателем попечительского совета городской женской гимназии. Кроме того, Г.Н. Максимов был крупным меценатом в городе. На собственные средства построил Крестовоздвиженский храм (ныне утрачен), мост через р. Тептянку, вносил крупные пожертвования на строительство гимназии, библиотеки, здания общественного собрания, приобрел участок земли для постройки католического костела и финансировал его строительство.

Все наследство купца Григория Николаевича перешло его сыну – купцу первой гильдии Ивану Григорьевичу Максиму.

Участок домовладения семьи Максимовых первоначально занимал всю ширину квартала, от ул. Никольской (совр. ул. Ленина) до ул. Береговой (совр. ул. Пузановой). На участке бывшего пер. Садового (совр. ул. Комсомольская), формирующего юго-западную границу квартала и домовладения, размещался купеческий сад, именуемый Максимовским.

В журнале торговых и промышленных заведений по г. Ачинску за 1882 г. указано, что ачинскому купцу Г.Н. Максиму принадлежала торговая лавка, размещавшаяся в собственном доме, и раменский погреб (табл. 4).

Таблица 4

**Выписка из журнала торговых и промышленных заведений
по г. Ачинску за 1882 г.**

Table 4

**Extract from the Journal of Commercial and Industrial Institutions
of Achinsk, 1882**

Какое заведение и где находится	Кому принадлежит заведение	Заметка о свойстве и размере торговли	Откуда получается товар
Лавка с мануфактурными товарами, в собственном доме	Ачинскому 2 гильдии купцу Григорию Николаевичу Максиму	Розничная торговля мануфактурными, галантерейными, мелочными товарами, золотыми и серебряными вещами. Заведение состоит из одного покоя с двумя наружными входами. Приказчика четыре человека, других служащих нет. Годовой оборот 100 000 руб. Склад товаров, при доме находится кладовая	Товары получают от разных лиц из Москвы, Ирбетской и Ивановской ярмарок
Раменский погреб в том же доме	Тому же купцу Максиму	Продажа разного рода водок, иностранных вин, пива. Погреб занимает часть лавки. Приказчиков и служащих нет. Годовой оборот, по словам хозяина, около 3000 руб., чистой прибыли около 300 руб.	Вина получают от Елисеева из С.-Петербурга

Более полные сведения о составе усадьбы встречаются в страховых ведомостях городских строений по г. Ачинску за 1901–1903 гг., где указано, что купцу Г.Н. Максиму принадлежал «Дом каменный двухэтажный, крытый железом. Каменный магазин, крытый железом. Каменные кладовые, крытые железом. Амбар деревянный, крытый железом» [11].

В 1912 г. границы домовладения меняются. На участке, формирующем перекрёсток ул. Береговой (совр. ул. Пузановой) и пер. Садового (совр. ул. Комсомольская) Г.Н. Максимовым был выстроен кинотеатр по проекту В.А. Соколовского (объект культурного наследия № 5 в табл. 2). Впоследствии здание кинотеатра с участком было продано городу.

По данным страховых ведомостей городских строений по г. Ачинску за 1913–1915 гг., состав усадьбы существенно расширился и уже включал: «Дом каменный двухэтажный, 8-стенный, крытый железом на 4 ската. Каменный магазин, крытый железом на 4 ската. Каменное складское помещение 4-скатное, крытое железом. Каменные кладовые, крытые железом. Каменный магазин, крытый железом» [12].

При натурном обследовании бывшего усадебного комплекса установлено, что высокая степень сохранности исторического состава. Основные изменения

объемно-планировочной структуры домовладения связаны с внедрением построек в более поздний период и утратой исторического ограждения и ворот.

Усадьба купца Г.Н. Максимова является объектом культурного наследия регионального значения – ансамбль «Усадьба Максимова», кон. XIX – нач. XX в., в состав которого входят памятники: «Дом жилой» (ул. Ленина, 24) (рис. 10, 11), «Флигель» (ул. Ленина, 24г), «Лавка» (ул. Ленина, 24а) (рис. 12), «Завозня» (ул. Ленина, 24а), «Конторско-складской корпус» (ул. Ленина, 24б) (рис. 13) (см. рис. 1, табл. 2).



Рис. 10. Усадьба купца Г.Н. Максимова. Фото кон. XIX – нач. XX в. [19]

Fig. 10. The Maksimiv's estate, 19th–20th centuries [19]



Рис. 11. Вид усадьбы купца Г.Н. Максимова с ул. Ленина. Объект культурного наследия регионального значения – ансамбль «Усадьба Максимова» (кон. XIX – нач. XX в.). Фото Д.В. Прислоновой, май 2022 г.

Fig. 11. The Maksimiv's estate, Lenin Street, the cultural heritage of regional importance, 19th–20th centuries Photograph by D.V. Prislono, May 2022



Рис. 12. Здание бывшего магазина усадьбы купца Г.Н. Максимова. Объект культурного наследия регионального значения «Лавка» (ул. Ленина, 24а). Фото Д.В. Прислоновой, май 2022 г.

Fig. 12. The Maksimiv's shop, Lenin Street, the cultural heritage of regional importance. Photograph by D.V. Prislono, July 2022



Рис. 13. Здание бывших кладовых усадьбы купца Г.Н. Максимова. Объект культурного наследия регионального значения «Конторско-складской корпус» (ул. Ленина, 24б). Фото Д.В. Прислоновой, май 2022 г.

Fig. 13. The Maksimiv's building of the former storerooms, the cultural heritage of regional importance. Photograph by D.V. Prislono, July 2022

В настоящее время в зданиях комплекса размещаются административные учреждения.

Главный жилой дом усадьбы имеет угловое расположение и фиксирует перекрёсток ул. Никольской (совр. ул. Ленина) и пер. Садового (совр. ул. Комсомольская). Архитектурно-композиционное решение соответствует направлению «кирпичного стиля» и практически дублирует жилой дом купца Мокроусова. Это дает основание предполагать, что автором проекта здания также являлся томский архитектор В.В. Хабаров и объекты построены примерно в один период.

Здание жилого дома усадьбы Максимова имеет особую историческую ценность для города, т. к. в нем останавливался император Николай II: «Во время кругосветного путешествия в 1891 г. Его Императорского Величества Государя Наследника Цесаревича и Великого Князя, а ныне благополучно Царствующего Его Императорского Величества Государя Императора Николая Александровича, в проезде по Восточной Сибири через гор. Ачинск, 1 и 2 июля 1891 г. имел пребывание в доме Максимова» [18].

Выводы

В результате историко-архитектурного анализа фрагмента исторической среды г. Ачинска – квартала в границах улиц Ленина (ранее ул. Никольская), Пузановой (ранее ул. Береговая), Дзержинского (пер. Иннокентьевский) и Комсомольской (пер. Садовый) – был выявлен ряд характерных особенностей в формировании пространственно-планировочной структуры и функциональной организации города в конце XIX – начале XX в.:

- купеческие домовладения группировались в целые кварталы и отличались развитой пространственно-планировочной структурой;
- для объектов характерно совмещение жилой и торгово-хозяйственной функций;
- отмечается строительство отдельно стоящих зданий лавок и магазинов в пределах домовладений;
- организация хозяйственно-складского блока на территории усадьбы.

В общей совокупности застройка квартала отличается ансамблевостью, стилистическим единством, композиционной целостностью и высокой степенью историко-архитектурной подлинности. Фронт застройки ул. Ленина (ранее ул. Никольская) в рассматриваемых границах сохранил исторический ритм и силуэт, архитектурно-стилистическую аутентичность. Кроме того, ряд зданий квартала являются образцами авторской архитектуры томского зодчего В.В. Хабарова, что освещает новую сторону его профессиональной деятельности и свидетельствует о межрегиональных связях.

Основными проблемами в сохранении подлинности и целостности исторической среды рассматриваемого фрагмента являются: частичная реконструкция исторической внутриквартальной застройки; внедрение современных построек, диссонирующих с исторической застройкой квартала по градостроительному (нарушение исторической планировки домовладений, расположение с отступом от красной линии) и архитектурно-художественному (материал,

пропорции, пластика фасадов) параметрам; утрата элементов исторического благоустройства (ворота, ограждения); отсутствие своевременных мер по консервации и ремонтно-реставрационным работам; частичное выведение функции из объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Резун Д.Я. Русские в среднем Причулымье в XVII–XIX вв. (Проблемы социально-экономического развития малых городов Сибири). Новосибирск : Наука, 1984. 194 с.
2. Царев В.И., Гринберг Ю.И. Ачинск: градостроительная история / Управление архитектуры и градостроительства исполкома городского Совета Ачинска. Красноярск : Стройиздат, 1992. 120 с.
3. Горбачёв В.Т., Крадин Н.Н., Крадин Н.П., Крушинский В.И., Степанская Т.М., Царёв В.И. Градостроительство Сибири / под общ. ред. В.И. Царёва ; Рос. акад. архит. и строит. наук, НИИ теории и истории архит. и градостроит. НИИТИАГ РААСН. Санкт-Петербург : Коло, 2011. 784 с.
4. Болтовская И.Ю., Прислонова Д.В. Историко-культурная ценность усадьбы А.М. Трескова на ул. Красного Октября, 14, в городе Ачинске // Региональные архитектурно-художественные школы. 2016. № 1. С. 390–394.
5. Прислонова Д.В. Архитектурно-градостроительная ценность Ачинского драматического театра (бывшего Общественного собрания) // Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. С. 847–856.
6. Прислонова Д.В. К проблеме сохранения ценной исторической застройки в малых городах Сибири (на примере усадьбы А.М. Трескова в г. Ачинске) // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2016) : материалы III Международной научной конференции студентов и молодых ученых. 2016. С. 759–768.
7. Прислонова Д.В., Ситникова Е.В. Вклад купечества в формирование культурно-просветительской инфраструктуры городов Красноярск и Ачинск // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 9–23. DOI 10.31675/1607-1859-2022-24-2-9-23
8. Бойко В.П. Социально-экономическая история города Ачинска и местное купечество // Вестник Том. гос. ун-та. История. 2022. № 75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomicheskaya-istoriya-goroda-achinska-i-mestnoe-kupechestvo> (дата обращения: 18.04.2023).
9. Быконя Г.Ф., Комлева Е.В., Погребняк А.И. Енисейское купечество в лицах (XVIII – начало XX в.). Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. 316 с.
10. Погребняк А.И. Купцы-предприниматели Енисейской губернии. Красноярск : Изд-во Краснояр. гос. торг.-экон. ин-та, 2002. 423 с.
11. Страховые ведомости и сметы городских строений по городу Ачинску, 1901–1903 гг. // Государственный архив Красноярского края. Ф. 595. Оп. 29. Д. 775.
12. Страховые ведомости по частным строениям домовладельцев города Ачинска, Енисейской губернии, 1913–1915 гг. // Государственный архив Красноярского края. Ф. 595. Оп. 53. Д. 595.
13. Список домовладельцев города Ачинска, 1917 г. // Архив г. Ачинска. Ф. 9. Оп. 1. Д. 53.
14. Журнал торговых и промышленных заведений по г. Ачинску, 1882 г. // Государственный архив Красноярского края. Ф. 160. Оп. 1. Д. 787.
15. Дело о постройке каменного дома купцом Мокроусовым в городе Ачинске, 1891 г. // Государственный архив Красноярского края. Ф. 595. Оп. 60. Д. 144.
16. Памятники истории и культуры Красноярского края. Выпуск 1. Предварительные материалы : сборник / отв. ред. Г.Ф. Быконя, Н.И. Дроздов [и др.] ; М-во культуры РСФСР. Красноярск : Кн. изд-во, 1989. 397 с.
17. Материалы муниципализованного дома № 22 по Советской улице (быв. Бородавкина) план дома, акт, домовый листок и квартирный листок, 1922 г. // Архив г. Ачинска. Ф. Р-17. Оп. 1. Д. 45.

18. Личное дело Максимова Григория Николаевича, 1901 г. // Государственный архив Красноярского края. Ф. 42. Оп. 1. Д. 3523.
19. Общий фотофонд // Ачинский краеведческий музей им. Д.С. Каргополова.

REFERENCES

1. Rezun D.Ya. Russians in the Middle Prichulymye in the 17th–19th centuries (Problems of socio-economic development of small towns in Siberia). Novosibirsk: Nauka, 1984. 194 p. (In Russian)
2. Tsarev V.I., Grinberg Yu.I. Achinsk: Urban history. Krasnoyarsk: Stroyizdat, 1992. 120 p. (In Russian)
3. Gorbachev V.T., Kradin H.H., Kradin N.P., Krushlinsky V.I., Stepankaya T.M., Tsarev V.I. (Ed.) Urban planning in Siberia. Saint-Petersburg: Kolo, 2011. 784 p. (In Russian)
4. Boltovskaya I.Yu., Prislonovala D.V. Historical and cultural value of the Treskov's estate on Krasny Oktyabrya Street in Achinsk. *Regional'nye arkhitekturno-khudozhestvennye shkoly*. 2016; (1): 390–394 (In Russian)
5. Prislonovala D.V. Architectural and town-planning of the Achinsk Drama Theater. In: *Proc. 62nd Sci. Conf. of Students and Young Scientists*. Tomsk, 2016. Pp. 847–856. (In Russian)
6. Prislonovala D.V. Preservation of valuable historical buildings in small towns of Siberia (on the example of the Treskov's estate). In: *Proc. 3rd Int. Sci. Conf. 'Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects'*, 2016. Pp. 759–768. (In Russian)
7. Prislonovala D.V., Sitnikova E.V. Merchants' contribution to the cultural and educational infrastructure of Krasnoyarsk and Achinsk. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (2): 9–23. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-9-23 (In Russian)
8. Boyko V.P. Socio-economic history of the city of Achinsk and local merchants. *Vestnik TSU*. 2022. 75. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomicheskaya-istoriya-goroda-achinska-i-mestnoe-kupechestvo> (accessed April 18, 2023). (In Russian)
9. Bykonya G.F., Komleva E.V., Pogrebnyak A.I. Yenisei merchant class in persons (18th–20th centuries). Novosibirsk, 2012. 316 p. (In Russian)
10. Pogrebnyak A.I. Merchants and entrepreneurs of the Yenisei province: An educational place. Krasnoyarsk, 2002. 423 p. (In Russian)
11. Krasnoyarsk State Archive. Form 595. List 29. File 775. Pp. 1901–1903. (In Russian)
12. Krasnoyarsk State Archive. Form 595. List 53. File 595. Pp. 1913–1915. (In Russian)
13. Achinsk State Archive. Form 9. List 1. P. 53. 1917. (In Russian)
14. Krasnoyarsk State Archive. Form 160. List 1. P. 787. 1882. (In Russian)
15. Krasnoyarsk State Archive. Form 595. List 60. P. 144. 1891. (In Russian)
16. Bykonya G.F., Drozdov N.I. (Eds., et al.) Monuments of history and culture of the Krasnoyarsk Krai. Issue 1: Preliminary materials. Krasnoyarsk, 1989. 397. (In Russian)
17. Achinsk State Archive. Form R-17. List 1. P. 45. 1922. (In Russian)
18. Krasnoyarsk State Archive. Form 42. List 1. P. 3523. 1901. (In Russian)
19. Kargopolov Achinsk Museum of Local Lore. (In Russian)

Сведения об авторах

Прислонова Дарья Валерьевна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, dasha.prislonovala@yandex.ru

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

Authors Details

Darya V. Prislonovala, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, dasha.prislonovala@yandex.ru

Elena V. Sitnikova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, elensivtomske@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 03.05.2023
Одобрена после рецензирования 10.05.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 03.05.2023
Approved after review 10.05.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 27–37.

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 (4): 27–37.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.4.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-27-37

EDN: IBFTGJ

КОГНИТИВНО-ПОВЕДЕНЧЕСКАЯ УРБАНИСТИКА: КРИТЕРИИ И ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Екатерина Анатольевна Артемова

ООО «Ресайклинг Констракшн», г. Воронеж, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Перемены, происходящие в стране и в мире, сопутствующие им события приводят к значительной психологической травматизации больших человеческих групп. Данный процесс влияет на изменение внутреннего состояния и отражается на массовом поведении людей. Городская среда, как фактор невербального воздействия на человека, может играть важную роль в психологическом оздоровлении большого количества людей.

Ключевой целью работы является выявление закономерностей влияния городской среды на психологию поведения больших групп людей с последующей разработкой критериев оценки и принципов формирования адаптивной урбанистической среды, оказывающей ресурсное влияние на психику человека.

Методы. Основой настоящего исследования является анализ и систематизация отечественного и зарубежного опыта формирования адаптивной городской среды на стыке нескольких направлений: архитектуры, градостроительства, психологии и социологии.

Результаты. В структуре «когнитивной урбанистики» выделено направление «когнитивно-поведенческая урбанистика», дано определение. Исследованы различные модели восприятия человеком городской среды. Разработаны критерии оценки урбанистической среды с точки зрения ее адаптивности. Предложены принципы проектирования адаптивных городских пространств.

Выводы. Показано, что определение критериев адаптивности городской среды позволяет проводить оценку городов с целью выявления дезадаптивных аспектов среды и их дальнейшего устранения. Перспектива восстановления и строительства новых городов создает необходимость дальнейшего исследования когнитивных урбанистических моделей с целью создания городской среды, оказывающей ресурсное влияние на психику человека.

Ключевые слова: градостроительство, архитектура, социология поведения, психология поведения, когнитивная урбанистика, когнитивно-поведенческая урбанистика, адаптивная городская среда, дезадаптивная урбанистическая среда

Для цитирования: Артемова Е.А. Когнитивно-поведенческая урбанистика: критерии и принципы формирования адаптивной городской среды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 27–37. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-27-37. EDN: IBFTGJ

ORIGINAL ARTICLE

COGNITIVE-BEHAVIORAL URBAN PLANNING: CRITERIA AND PRINCIPLES OF ADAPTIVE URBAN ENVIRONMENT**Ekaterina A. Artemova**

ООО "Recycling Construction", Voronezh, Russia

Abstract. Purpose: The aim of the work is to identify the influence of the urban environment on psychological behavior of large groups of people with the subsequent evaluation of formation criteria and principles of the adaptive urban environment.

Methodology: The analysis and systematization of Russian and foreign experience in the formation of the adaptive urban environment in architecture, urban planning, psychology, and sociology. Various types of human perception of the urban environment are studied. Based on sociological data, the percentage of people with different perception of space is determined.

Research findings: In cognitive urban studies, cognitive-behavioral urban studies are determined. Various models of human perception of the urban environment are studied. Criteria for assessing the urban environment are developed, which identify adaptive and maladaptive elements of urban space. The selected criteria make it possible to predict a positive or negative impact on the development of urban spaces at the initial design stage. A thorough analysis of the territory development allows choosing the most effective of them to provide the formation of the adaptive urban environment affecting the human psyche.

Practical implications: Research results can be used in theory and practice of architecture and urban planning and complement training programs for specialists. Formation criteria and principles of the adaptive urban environment can be included in the design of urban spaces at various levels. Research contributes to further actualization of the human-oriented approach in urban studies and can be integrated in the Human Ecology discipline.

Originality/value: The paper proposes monitoring of adaptability of urban spaces according to the given criteria. The principles are developed to carry out a new design, reconstruction or renovation of urban areas. The environment created in this way can have a positive impact on the psychological state of a person.

Keywords: urban planning, architecture, sociology of behavior, psychology of behavior, cognitive urban studies, cognitive-behavioral urban studies, adaptive urban environment, maladaptive urban environment

For citation: Artemova E.A. Cognitive-behavioral urban planning: Criteria and principles of adaptive urban environment. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 27–37. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-27-37. EDN: IBFTGJ

Введение

Человек находится в постоянном взаимодействии с той средой, которая его окружает. Ежедневно он контактирует с объектами городской среды природного и антропогенного характера. Передвигаясь по городу, люди сталкиваются с различными произведениями архитектуры и градостроительного искусства, имеющими определенное функциональное назначение, масштаб, композиционное и стилистическое исполнение, цветовое решение. От архитектурной и композиционной целостности городской среды зависит внутреннее ощущение и состояние людей, которые проживают в пределах ее территории [1, 2, 3]. Окружающая среда оказывает влияние на психику человека, что, в свою очередь, запускает ответные реакции и формирует соответствующее поведение [4, 5].

Проблема создания городской среды, в которой заложено ресурсное влияние на психологическое состояние жителей, в настоящее время стоит особенно остро из-за повышенного воздействия внешних факторов, стимулирующих стресс и общую тревожность людей.

Для комплексного изучения влияния городской среды на психологию поведения людей недостаточно провести анализ отечественного и зарубежного опыта в области теории архитектуры и градостроительства. Необходимо дополнительно систематизировать соответствующие знания в области социологии и психологии.

Важнейшие базовые исследования влияния искусства, архитектуры и окружающей среды на людей отражены в трудах Г. Лебона, З. Фрейда, К.Г. Юнга, В.М. Бехтерева, Д. Уотсена, Б. Скинера, Э. Толмена. Исследуя влияние искусства и архитектуры на массы и формирование «души города», Г. Лебон сделал акцент на доминировании чувственного восприятия человека над наблюдением в большом скоплении людей. З. Фрейд выдвинул гипотезы о воздействии искусства на человека через его бессознательное и о компенсаторном влиянии искусства на психику людей. К.Г. Юнг разработал теорию архетипов культуры и применил психоаналитический подход к исследованию влияния архитектуры на человека. В.М. Бехтерев сформулировал концепцию «коллективной рефлексологии». Представители поведенческой психологии Д. Уотсен, Б. Скиннер, Э. Торндайк внесли значительный вклад в развитие теории влияния среды на поведение людей. Продолжая их исследования, Э. Толмен ввел понятие когнитивных карт как отраженного сознанием окружающего мира. Он обнаружил сходство между когнитивными моделями внешней среды и психическими конструкциями человека.

Значительный вклад в изучение процесса восприятия человеком искусства и логики познания пространства, форм, цвета и света, движения и напряжения внесли Р. Арнхейм и Е.Б. Володина.

Наиболее значимыми трудами в области исследования влияния архитектурной среды на эмоциональное состояние и психологию поведения человека являются работы А.В. Степанова, В.В. Шилина, С.У. Голдхаген, Т.В. Дробышевой, Г.Б. Забельшанского и Г.Б. Минервина, М. Черноушек, К. Элларда, К. Дэй, А.Л. Титова, Д.Н. Тапалчинова, М.П. Березина.

А.В. Крашенинников ввел в научный оборот понятие «когнитивная урбанистика», разработал когнитивные модели городской среды, которые позволяют облегчить как процесс предпроектного анализа, так и дальнейшее проектирование городских пространств разного уровня [6, 7, 8, 9].

Целью настоящего исследования является разработка критериев оценки и принципов формирования адаптивной урбанистической среды с учетом ее влияния на поведение больших групп людей.

Исследование когнитивно-поведенческих аспектов влияния городской среды на психологическое состояние жителей и формирование принципов создания адаптивной урбанистической среды позволит создавать городские пространства, способствующие установлению и поддержанию устойчивого ресурсного психологического состояния больших групп людей, улучшению качества их жизни.

Результаты

Архитектурное произведение невербально влияет на психику человека и может погрузить его в состояние спокойствия, тревоги, печали, радости или спровоцировать на агрессивное поведение. Человек, как зритель, сталкиваясь с определенным произведением искусства, может оценить и прочувствовать его совершенно по-разному, т. к. каждая личность имеет свой уникальный жизненный опыт и индивидуальные «настройки» восприятия [10, 11, 12].

Модель восприятия человеком городской среды в целом не отличается от привычного процесса восприятия им другой информации [13]. Каждый человек воспринимает внешние события через призму собственных убеждений, ценностей и установок. Подобная коммуникационная модель позволяет сделать вывод, что люди могут реагировать на определенные события или предметы искусства по-разному, в соответствии со своими внутренними «фильмами» [14].

Для прогноза влияния урбанистического пространства на психологию групп людей необходимо составить «портрет» аудитории.

На первом этапе оценки человек анализирует окружающую среду посредством репрезентативных систем. По данным научных исследований в области психологии и нейролингвистического программирования, выявлено:

- 35–40 % людей руководствуются визуальной репрезентативной системой;
- 20–25 % людей предпочитают слуховую систему восприятия;
- 40 % людей отдают приоритет кинестетическому восприятию [15].

Таким образом, определенный процент людей ведет диалог с окружающей средой, используя в большей степени визуальную систему, другая часть отдает приоритет слуховой или кинестетической системам. В связи с этим при проектировании урбанистических пространств различного масштаба и функциональной направленности необходимо принимать во внимание язык общения его посетителей с окружающей средой. Это позволит достигнуть взаимопонимания между тремя участниками невербального диалога: архитектором, городской средой и ее жителями.

Для формулирования авторского подхода к решению проблемы создания городской среды, оказывающей ресурсное влияние на психологическое состояние больших групп людей, предлагается ввести понятие «когнитивно-поведенческая урбанистика» как составляющее когнитивной урбанистики. Предлагается рассматривать когнитивно-поведенческую урбанистику как комплексное направление исследований, центрированное на восприятии человеком окружающей среды и нацеленное на исследование поведения больших групп людей в городской среде и создание моделей адаптивной урбанистической среды.

Адаптивная урбанистическая среда – городская среда, которая помогает человеку поддерживать себя в «ресурсном» психологическом и физическом состоянии.

Ресурсное состояние – это состояние, при котором у человека достаточно энергии на осуществление задуманных планов, он позитивно смотрит в будущее, легче переносит стресс, физически активен и психически здоров.

Адаптивная среда поддерживает человека в любой жизненной ситуации: создает ощущение безопасности, защищенности и спокойствия; стимулирует в человеке позитивное движение энергии и создает вдохновение; оздоравливает человека психологически и физически. При долгосрочном воздействии адаптивная среда может вызвать положительные изменения в культуре поведения как одного человека, так и больших групп людей.

Деадаптивная урбанистическая среда – городская среда, которая приводит к психологическому и физическому истощению, упадку сил, апатии; травмирующе действует на психическое и физиологическое состояние человека; не отвечает базовым потребностям человека, необходимым для его комфортного проживания и продуктивной жизнедеятельности. В зависимости от продолжительности влияния деадаптивная среда может вызвать искажение в культуре поведения как одного человека, так и больших групп людей в целом.

Адаптивная урбанистическая среда должна быть удобна и комфортна для людей с разными типами восприятия. Поэтому ее необходимо проектировать разнообразной, сочетающей в себе элементы различных репрезентативных систем восприятия:

- визуальной системы восприятия, обеспечивающей гармоничное сочетание форм и элементов архитектурной композиции, единство многообразия;
- слуховой: внедрение разного рода звукового воздействия на посетителей, таких как музыка, пение, чтение, звуки природы;
- кинестетической: организация пространства, способствующего реализации творческого потенциала личности, возможности ощутить значимость и масштаб архитектурных элементов посредством прикосновений, внутренних ощущений и эмоций;
- обонятельной: включение в урбанистическое пространство элементов ароматерапии, позволяющей привести в баланс психофизическое состояние людей, уменьшить стресс;
- вкусовой: организация урбанистических пространств с возможностью удовлетворения базовой потребности в пище;
- слуховой внутренней системы (внутренняя беседа человека с самим собой): возможность остаться наедине со своими мыслями и чувствами, например, улучшить психофизическое состояние во время занятий различными видами спорта, творчеством или образовательной деятельностью.

Процесс обработки информации психикой человека продолжается после ее репрезентации через органы чувств. На следующем этапе информация мгновенно проходит через «внутренние фильтры» и обретает форму мысли. Она может содержать зрительные образы, внутренние размышления, набор звуков и других ощущений. В дальнейшем на состояние человека влияет то, согласен ли он и нравятся ли ему возникающие в его голове мысли, чувства и ощущения по отношению к определенному объекту архитектурного искусства. Именно от внутреннего состояния человека зависят его дальнейшие действия [14].

Важно и время, в течение которого на человека воздействует объект архитектурного искусства: находится ли он постоянно под его влиянием, периодически вступает в невербальный диалог или взаимодействие кратковременное. Имеет значение и то, находится человек в одиночестве или в составе

группы и каковы ее количественные характеристики. В этой связи когнитивные модели городских пространств различного уровня рассматриваются в качестве составляющих конструкторов адаптивных урбанистических сред и могут быть использованы для их дальнейшего моделирования, исследования и проектирования [7].

Для проведения оценки городской среды с точки зрения ее адаптивности для больших групп людей предлагаются следующие критерии:

- функционально-физиологическая адаптивность: оценивается уровень соответствия городского пространства требованиям людей к их функциональной наполненности; анализируется удобство территориальной взаимосвязи зон между собой; оцениваются возможности удовлетворения базовых физиологических потребностей людей;

- психолого-оздоровительная адаптивность: оценивается уровень возможного влияния на оздоровление и восстановление психологического и физического состояния посетителей; производится оценка влияния используемых архитектурных приемов на общее психологическое и физическое состояние людей;

- социально-коммуникативная адаптивность: оценивается потенциал среды для ведения коммуникационной активности;

- культурно-архетипическая адаптивность: урбанистическая среда оценивается с точки зрения ее культурной, исторической и ментальной идентичности в отношении того места, в котором она расположена;

- эстетико-композиционная адаптивность: оценивается гармоничность интеграции урбанистического пространства в природную среду, преемственность развития вновь созданной и исторической ткани города; проводится анализ общей композиционной целостности городской среды, в том числе с точки зрения всех типов восприятия людьми урбанистического пространства;

- образовательно-творческая адаптивность: городская среда оценивается с точки зрения возможности реализации творческого потенциала посетителей, условий для ведения образовательной деятельности;

- интеллектуально-трансформационная адаптивность: оценивается внедрение в среду элементов искусственного интеллекта, ее способность анализировать данные и трансформироваться в зависимости от изменения потребностей людей, других качественных и количественных показателей;

- эколого-восстановительная адаптивность: оценивается уровень интеграции урбанистического пространства в природную среду (с точки зрения увеличения антропогенной нагрузки на природу или оздоровления окружающей среды посредством включения искусственно созданных элементов ландшафта, работы по восстановлению состояния нарушенных территорий, инженерной подготовки «неудобий»); оценивается потенциал естественного восстановления природной среды и возможности вторичного применения используемых и образованных в городской среде ресурсов (в том числе после завершения срока службы отдельных элементов среды); экологичность используемых материалов; степень влияния городского пространства и его элементов на увеличение или снижение вредных выбросов в атмосферу Земли;

– инклюзивная адаптивность: оценивается доступность городской среды для маломобильных групп населения.

Настоящие критерии могут быть использованы не только при оценке уровня адаптивности сложившейся городской среды, но и при новом проектировании, реконструкции, реновации и восстановлении разрушенных городских территорий. В комплексе все данные, полученные в результате анализа различных проектных решений по представленным критериям, позволят сделать прогноз, какой из вариантов развития городской среды наиболее адаптивен и сможет оказать максимальный положительный эффект на поддержание и восстановление ресурсного психологического состояния потенциальной аудитории.

Выводы

Разработанные критерии оценки адаптивности урбанистической среды легли в основу формирования принципов адаптивных городских пространств. Для создания адаптивного городского пространства архитектору при проектировании необходимо руководствоваться следующими принципами:

1. Функциональности: функциональное наполнение должно удовлетворять физиологические потребности людей в безопасности и оздоровлении, защите, комфорте, коммуникации или уединении, творческом самовыражении. Различные зоны должны быть удобно взаимосвязаны между собой. При разработке проектных предложений необходимо продумывать сценарии посещения объекта проектирования как одним человеком, так и группами людей, которые отличаются по различным признакам: по типу восприятия пространства, по возрасту, по цели посещения и т. д.

2. Экологичности и оздоровления: в оформлении городских пространств необходимо применять экологически чистые материалы. Следует формировать элементы городского ландшафта приближенными к природным аналогам. Необходимо создавать среду, способствующую снижению выделения и воздействия вредных выбросов в атмосферу Земли, формируя устойчивое экологическое развитие городских территорий. В проектном решении должна быть заложена возможность вторичного использования применяемых материалов, изделий и конструкций после завершения срока их эксплуатации по заданной проектом функции. При этом нужно предусматривать вторичное применение тех элементов, которые будут созданы, образованы или получены непосредственно на территории городского пространства. Адаптивная среда должна способствовать формированию экономики замкнутого цикла.

В результате активного развития промышленности природная среда подвергается мощному антропогенному воздействию, вследствие чего образуются разного рода нарушенные территории (отработанные карьеры, отвалы отходов производств и т. д.). Кроме того, активный рост городов постепенно вызывает дефицит наиболее благоприятных территорий под застройку, в этой связи возникает необходимость в развитии неудобий (территорий со сложным рельефом, болотистой местности, участков с высоким уровнем грунтовых вод и т. д.). При проектировании на нарушенных участках и территории неудобий необходим особый подход. Нарушенные территории нуждаются в восстановлении и оздоровлении. После восстановления следует производить подбор возможных без-

опасных вариантов использования данных участков. В случае с территориями неудобий нужно осуществлять более сложную инженерную подготовку участков, прежде чем использовать их для дальнейшего развития города.

Создаваемое адаптивное пространство должно быть безопасным как для природы в целом, так и для человека, поддерживать и восстанавливать баланс сил и энергии для полноценного функционирования.

3. Экономичности и эргономичности: при формировании элементов композиции необходимо находить баланс между эстетическими качествами проектируемого объекта и возможностью его практической реализации, анализировать варианты с точки зрения их экономической целесообразности и практического выполнения объектом требуемых функций. Необходимо выбирать решение, способствующее бережному отношению к ресурсам и достижению максимально эффективного практического результата.

4. Коммуникации и уединения: создаваемая среда должна содержать в себе элементы, позволяющие посетителям налаживать коммуникацию друг с другом, удовлетворять потребность в общении, сохраняя тем самым общие ценности, находить взаимные интересы и проявлять способность поддерживать друг друга в различных жизненных ситуациях. Наряду с этим необходимо также создать среду для уединения, дающую возможность почувствовать себя личностью, остаться наедине с собой и своими мыслями, восстановить энергию и силы, заняться творчеством или спортом.

5. Культурной и исторической идентичности: на начальном этапе проектирования нужно проводить комплексный анализ населенного пункта, в котором находится территория проектирования. В ходе исследования необходимо изучить культурные и исторические особенности местности, ее архитектурную идентичность. Адаптивную среду следует формировать с учетом выявленных культурно-исторических особенностей местности. Иначе вновь созданная среда будет восприниматься людьми как дезадаптивная, чуждая, не имеющая ничего общего с их духовными и нравственными ценностями.

6. Композиционного единства: в основе проектных решений, создаваемых для урбанистических территорий, должно лежать преемственное развитие вновь созданной и исторической среды города. Необходимо достигать гармонии элементов городской среды, руководствуясь при этом визуальными принципами геометрической композиции. Базовыми инструментами создания гармоничной композиции являются законы золотого сечения. Они сочетают в себе визуальные соотношения, основанные на пропорциях и законах математики.

7. Созидания: адаптивная среда должна создавать возможности для творческой реализации посетителей и получения ими новых знаний.

8. Трансформируемости: адаптивность среды должна быть выражена в ее способности к самоанализу и трансформации в зависимости от полученных данных и меняющихся потребностей людей.

9. Самовосстановления: данный принцип тесно связан с принципами трансформируемости, экологичности и оздоровления, он отвечает за способность элементов архитектурной среды самовосстанавливаться на протяжении временного воздействия или других факторов, изменяющих его исходные данные и параметры. Необходимо стремиться к использованию в городской

среде возобновляемых природных ресурсов, чтобы снизить антропогенную нагрузку на природу, содействуя устойчивому развитию территорий.

10. Инклюзивности: при формировании адаптивной среды необходимо обеспечивать равную степень доступности всех ее элементов для каждого посетителя без потери информационной и функциональной наполненности представленных в городском пространстве зон.

Разработанные принципы организации адаптивной городской среды позволяют выявить желательные и нежелательные инструменты творчества архитектора в создании урбанистического пространства, оказывающего ресурсное влияние на психологическое состояние людей.

Заключение

Таким образом, формирование аналитической системы исследования урбанистических территорий с точки зрения их адаптивности позволяет увидеть полноценную картину влияния городской среды на ее жителей.

Анализ по критериям адаптивности урбанистической среды может проводиться при новом проектировании, реконструкции, реновации и восстановлении города с целью выбора лучшего варианта по развитию территорий.

Разработанные в процессе исследования критерии адаптивности урбанистических пространств позволяют проводить оценку сложившихся городских территорий. При этом важной задачей является не только выявление адаптивных аспектов среды, но и поиск дезадаптивных участков с целью их дальнейшего устранения.

При проектировании городских пространств целесообразно воспользоваться разработанными в результате исследования принципами создания адаптивной урбанистической среды. Это позволит создать городскую среду, оказывающую ресурсное влияние на психику человека.

Результаты научного исследования могут быть использованы в развитии теории и практики архитектуры и градостроительства; могут дополнить программы обучения и повышения квалификации специалистов соответствующих областей. Представленные в статье критерии и принципы формирования адаптивной городской среды могут быть включены в методические рекомендации по проектированию городских пространств различного уровня.

Приведенные данные исследований способствуют дальнейшей актуализации человеко-центрированного подхода в урбанистике и могут быть интегрированы в междисциплинарную науку «Экология человека».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Тапалчинова Д.Н.* Влияние архитектуры зданий на психологическое состояние человека // Молодой ученый. 2019. № 23 (261). С. 67–68. URL: <https://moluch.ru/archive/261/60383/> (дата обращения: 20.07.2022).
2. *Шулер Р.М.* Психологические аспекты архитектурного проектирования // Теоретический и практический потенциал современной науки. 2021. Т. Ч. X. С. 5–7. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47133464> (дата обращения: 10.10.2022).
3. *Ткачева А.С.* Психологическое воздействие архитектуры и архитектурной среды на человека // Образование. Наука. Производство. 2021. С. 333–337. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47278828> (дата обращения: 15.09.2022).

4. Smejkal K. Architectural psychology – a challenge for a new generation of architects // *Architecture. Construction. Education*. 2019. № 1 (13). P. 32–38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38486758> (дата обращения: 26.10.2022).
5. Abel A. What is Architectural Psychology // *Dimensions of Architectural Knowledge*. 2021. P. 201–208. URL: <https://doi.org/10.14361/dak-2021-0126> (дата обращения: 05.10.2022).
6. Крашенинников А.В. Социальная интеграция в моделях городской среды // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. № 4 (45). С. 329–338. URL: http://marhi.ru/AMIT/2018/4kvart18/23_krashennnikov/index.php (дата обращения: 26.07.2022).
7. Крашенинников А.В. Перспективные модели публичных пространств городской среды // *Архитектура и строительство России*. 2019. № 1 (229). С. 34–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37608990> (дата обращения: 05.08.2022).
8. Krashennnikov A.V. Accessibility and connectivity as the key factors of the macro-space in built environment // *Civil Engineering and Architecture*. 2019. V. 7. № 2. P. 37–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41649015> (дата обращения: 10.09.2022).
9. Крашенинников А.В. Три проблемы пространственной организации урбанизированных территорий // *Городская среда и городское развитие*. 2020. С. 42–47. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45594101> (дата обращения: 09.10.2022).
10. Виноградова Е.И., Кулиминик Е.В. Анализ архитектурно-психологических исследований конца XX – начала XXI века // *Артикульт*. 2020. № 3 (39). С. 137–148. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44134527> (дата обращения: 10.10.2022).
11. St-Jean P., Grant O.C., Jemtrud M. A review of the effects of architectural stimuli on human psychology and physiology // *Building and Environment*. 2022. V. 219. 10 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322004188> (дата обращения: 05.10.2022).
12. Roessler K.K., Weber S., Tawil N., Kühn S. Psychological attributes of house facades: A graph network approach in environmental psychology // *Journal of Environmental Psychology*. 2022. V. 82. 6 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101846> (дата обращения: 06.10.2022).
13. Sen S., Guchhait S.K. Urban green space in India: Perception of cultural ecosystem services and psychology of situatedness and connectedness // *Ecological Indicators*. 2021. V. 123. 16 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21000030> (дата обращения: 16.10.2022).
14. Рыжанова Д.А. Психология восприятия элементов архитектуры и дизайна // *Строительство и реконструкция : сборник научных трудов 3-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров*. 2021. С. 371–374. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46282465> (дата обращения: 21.10.2022).
15. D'Acci L.S. Preferring or Needing Cities? (Evolutionary) psychology, utility and life satisfaction of urban living // *City, Culture and Society*. 2021. V. 24. 19 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877916621000059> (дата обращения: 16.10.2022).

REFERENCES

1. Tapalchinova D.N. The influence of building architecture on the psychological state of a person. *Molodoi uchenyi*. 2019; 23 (261): 67–68. Available: <https://moluch.ru/archive/261/60383/> (accessed July 20, 2022). (In Russian)
2. Shuler R.M. Psychological aspects of architectural design. In: *Theoretical and practical potential of modern science*. 2021. Pp. 5–7. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=47133464 (accessed October 10, 2022). (In Russian)
3. Tkacheva A.S. Psychological impact of architecture and architectural environment on a person. In: *Education. Science. Production*. 2021. Pp. 333–337. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=47278828 (accessed September 15, 2022). (In Russian)
4. Smejkal K. Architectural psychology – a challenge for a new generation of architects. *Architecture. Construction. Education*. 2019; 1 (13): 32–38. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=38486758 (accessed October 26, 2022).
5. Abel A. What is architectural psychology. *Dimensions of architectural knowledge*. 2021. Pp. 201–208. Available: <https://doi.org/10.14361/dak-2021-0126> (accessed October 5, 2022).

6. Krashennnikov A.V. Sotsial'naya integratsiya v modelyakh gorodskoi sredy. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018; 4 (45): 329–338. Available: http://marhi.ru/AMIT/2018/4kvart18/23_krashennnikov/index.php (accessed July 26, 2022). (In Russian)
7. Krashennnikov A.V. Perspective models of public spaces in urban environment. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2019; 1 (229): 34–39. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=37608990 (accessed August 5, 2022). (In Russian)
8. Krashennnikov A.V. Accessibility and connectivity as the key factors of the macro-space in built environment. *Civil Engineering and Architecture*. 2019; 7 (2): 37–41. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=41649015 (accessed September 10, 2022).
9. Krashennnikov A.V. Three problems of spatial organization of urbanized territories. In: Urban environment and urban development. 2020. Pp. 42–47. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=45594101 (accessed October 9, 2022). (In Russian)
10. Vinogradova E.I., Kilimnik E.V. Analysis of architectural and psychological studies late in the 20th and early 21st centuries. *Artikul't*. 2020; 3 (39): 137–148. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=44134527 (accessed October 10, 2022). (In Russian)
11. St-Jean P., Grant O.C., Jemtrud M. A review of the effects of architectural stimuli on human psychology and physiology. *Building and Environment*. 2022; 219: 10. Available: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322004188 (accessed October 5, 2022).
12. Roessler K.K., Weber S., Tawil N., Kühn S. Psychological attributes of house facades: A graph network approach in environmental psychology. *Journal of Environmental Psychology*. 2022; 82: 6. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101846> (accessed October 06, 2022).
13. Sen S., Guchhait S.K. Urban green space in India: Perception of cultural ecosystem services and psychology of situatedness and connectedness. *Ecological Indicators*. 2021; 123: 16. Available: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21000030 (accessed October 16, 2022).
14. Ryzhanova D.A. Psychology of perception of elements of architecture and design. In: *Proc. 3rd All-Russ. Conf. 'Construction and Reconstruction'*, 2021. Pp. 371–374. Available: www.elibrary.ru/item.asp?id=46282465 (accessed October 21, 2022). (In Russian)
15. D'Acci L.S. Preferring or needing cities? (Evolutionary) psychology, utility and life satisfaction of urban living. *City, Culture and Society*. 2021; 24: 19. Available: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877916621000059 (accessed October 16, 2022).

Сведения об авторе

Артемова Екатерина Анатольевна, магистр градостроительства, директор, ООО «Ресайклинг Констракшн», 394086, г. Воронеж, ул. Южно-Моравская, 50/1, rc-36@yandex.ru

Author Details

Ekaterina A. Artemova, Master, Director ООО “Recycling Construction”, 50/1, Yuzhno-Moravskaya Str., 394086, Voronezh, Russia, rc-36@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29.10.2022
Одобрена после рецензирования 24.04.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 29.10.2022
Approved after review 24.04.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 38–44.

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 (4): 38–44.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-38-44

EDN: IQFUPL

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТИЛЯ АРХИТЕКТУРЫ ЗДАНИЯ

Петр Андреевич Пылов¹, Анна Владимировна Дягилева¹,
Евгения Александровна Николаева¹, Татьяна Анатольевна Шалыгина²

¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность темы исследования обусловлена постоянным ростом интереса к тематике цифровой трансформации общества и всех сфер деятельности, в которое оно вовлечено. Одним из важных этапов развития любого социума является изучение его истории, сохранившейся в артефактах инженерной мысли сооружений прошлых поколений. Поскольку каждая эпоха отличается характерными особенностями, то закономерно менялись и архитектурные идеи, которые неразрывно связывают определенную эпоху со стилем построек зданий и сооружений.

Основная цель исследования – разработать программное решение, которое в автоматизированном формате сможет определять стиль архитектурной постройки здания.

Для любого интересующегося историей человека, вне зависимости от пола и возраста, порой недостаточно изучить материалы исторических книг, чтобы безошибочно определять архитектурный стиль здания. Как и в большинстве других областей знаний, очень важна практика, восполнить недостаток которой поможет разработанная авторами интеллектуальная модель на основе методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, архитектура зданий

Для цитирования: Пылов П.А., Дягилева А.В., Николаева Е.А., Шалыгина Т.А. Разработка интеллектуальной модели для автоматизированного определения стиля архитектуры здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 38–44. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-38-44. EDN: IQFUPL

ORIGINAL ARTICLE

INTELLIGENT MODEL FOR AUTOMATED IDENTIFICATION OF ARCHITECTURAL STYLE

Petr A. Pylov¹, Anna V. Dyagileva¹,
Evgeniya A. Nikolaeva¹, Tat'yana A. Shalygina²

¹Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The growing interest to the digital development of the society stipulate studies of its history described by the artifacts of structures of past generations. Since each epoch has its own characteristics, architectural ideas inextricably linking certain years to the architectural style of buildings, have changed.

Purpose: The aim of this work is the software development for the identification the architectural style of architectural a building.

Research findings: For anyone interested in history, regardless of their gender and age, it is sometimes not enough to read historical books in order to determine the architectural style of a building. The artificial intelligence model is proposed to fill this gap.

Practical implications: The proposed model can be used to supplement the practical experience in the field.

Keywords: artificial intelligence, computer-aided learning, architectural style

For citation: Pylov P.A., Dyagileva A.V., Nikolaeva E.A., Shalygina T.A. Intelligent model for automated identification of architectural style. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 38–44. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-38-44. EDN: IQFUPL

Современные информационные технологии находят широкое применение во все больших сферах повседневной человеческой деятельности. Связано это в первую очередь с тем, что ускорение научно-технического прогресса позволило удешевить реализацию вычислительных центров, на основе которых функционируют интеллектуальные системы [1].

Интеллектуальные системы, которые зиждутся на моделях машинного обучения, позволяют автоматизировать задачи, ранее считавшиеся исключительно прерогативой человека [2].

Примерами творческих задач могут служить обработка текстов, классификация изображений, определение композиции на основе проигрывания мелодии.

Определение архитектурного стиля здания – также творческая задача, поскольку она подразумевает анализ различных компонентов сооружения, определение эпохи постройки и её принадлежности к конкретному стилю.

Кроме того, решить подобную задачу методами прямого программирования не представляется возможным [3], что ограничивает выбор инструментария для решения задачи на моделях прикладного искусственного интеллекта.

Определимся с целью: необходимо, чтобы модель машинного обучения могла самостоятельно определять архитектурный стиль здания по его фотографии.

Для решения практических задач аналитики изображений отлично зарекомендовали себя сверточные нейронные сети, т. к. они позволяют абсорбировать на снимках низко-, средне- и высокоуровневые признаки, что дает возможность сформировать высокую обобщающую способность информационной модели искусственного интеллекта [4]. Однако стоит отметить, что каждая прикладная задача не может быть решена на основе однотипной архитектуры сверточной нейронной сети, поскольку такой подход негативно отражается на итоговой точности модели машинного обучения.

Краеугольным камнем любой модели машинного обучения являются исходные данные. Именно под них разрабатывается модель, т. к. она должна учитывать природу выборки, тип её математического распределения и многие другие факторы, которые изменяются при переходе от одной предметной области к другой [5].

В качестве основы для автоматизированного определения архитектурного стиля здания интеллектуальной системой был выбран набор данных, собранный авторами исследования «Architectural Style Classification Using Multinomial Latent Logistic Regression»¹.

Авторы научной работы использовали в качестве базового алгоритма модель логистической регрессии, т. к. желали максимально снизить уровень требований модели к аппаратным ресурсам электронной вычислительной машины (ЭВМ), на которой алгоритм сможет функционировать. Отметим, что оригинальная статья авторов вышла в свет в 2014 г. и с тех пор не обновлялась, при этом точность модели составила 69,17 %.

За прошедший с момента публикации статьи период технологии электронной промышленности шагнули далеко вперед, поэтому даже на бюджетных версиях ЭВМ сейчас могут функционировать модели обученных нейронных сетей [6].

Авторы настоящей статьи в качестве основополагающей идеи рассматривают решение задачи определения архитектурных стилей зданий на основе модернизированной сверточной нейронной сети. Как было отмечено выше, для конкретной прикладной задачи необходимо разработать собственную архитектуру модели машинного обучения, поэтому авторами была разработана структурная схема модели машинного обучения (рис. 1).

Проверка эффективности разработанной архитектуры была произведена на основе сопоставления точности спроектированной модели сверточной нейронной сети (рис. 1) и «базовой» точности логистической регрессии, которая составляет 69,17 %.

Эксперименты показали, что наименьшая точность модели машинного обучения, представленной в рамках данной статьи, составила 74 % (рис. 2).

¹ Zhe Xu, Tao D., Ya Zhang, Wu J., Tsoi A. Architectural Style Classification Using Multinomial Latent Logistic Regression. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Architectural-Style-Classification-Using-Latent-Xu-Tao/bf6fd53680c5ec7b998c60bd75243d5b7cf7f93f?p2df>

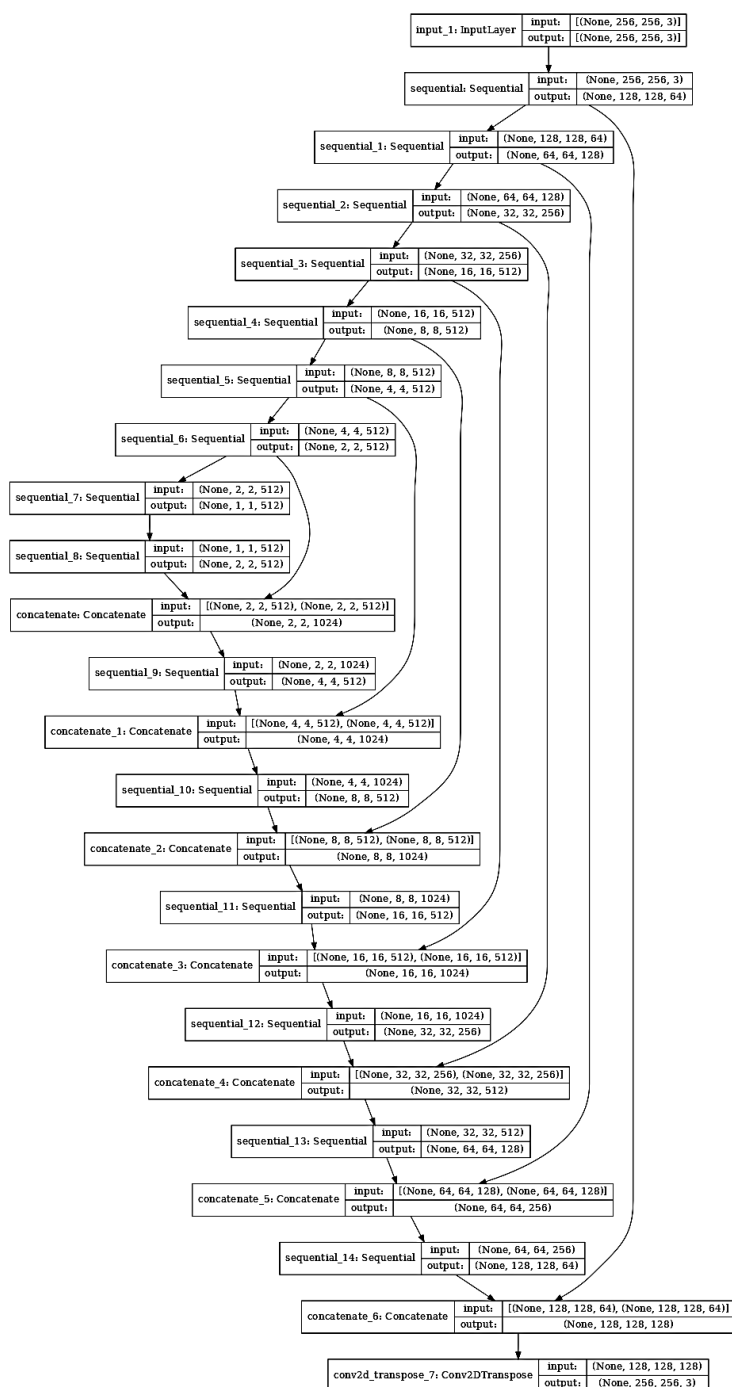


Рис. 1. Архитектура модели сверточной нейронной сети для определения стиля архитектуры здания. Изображение сгенерировано на основе программной библиотеки sklearn

Fig. 1. Model architecture of convolutional neural network for identification of the building architectural style. The image is generated by the sklearn library

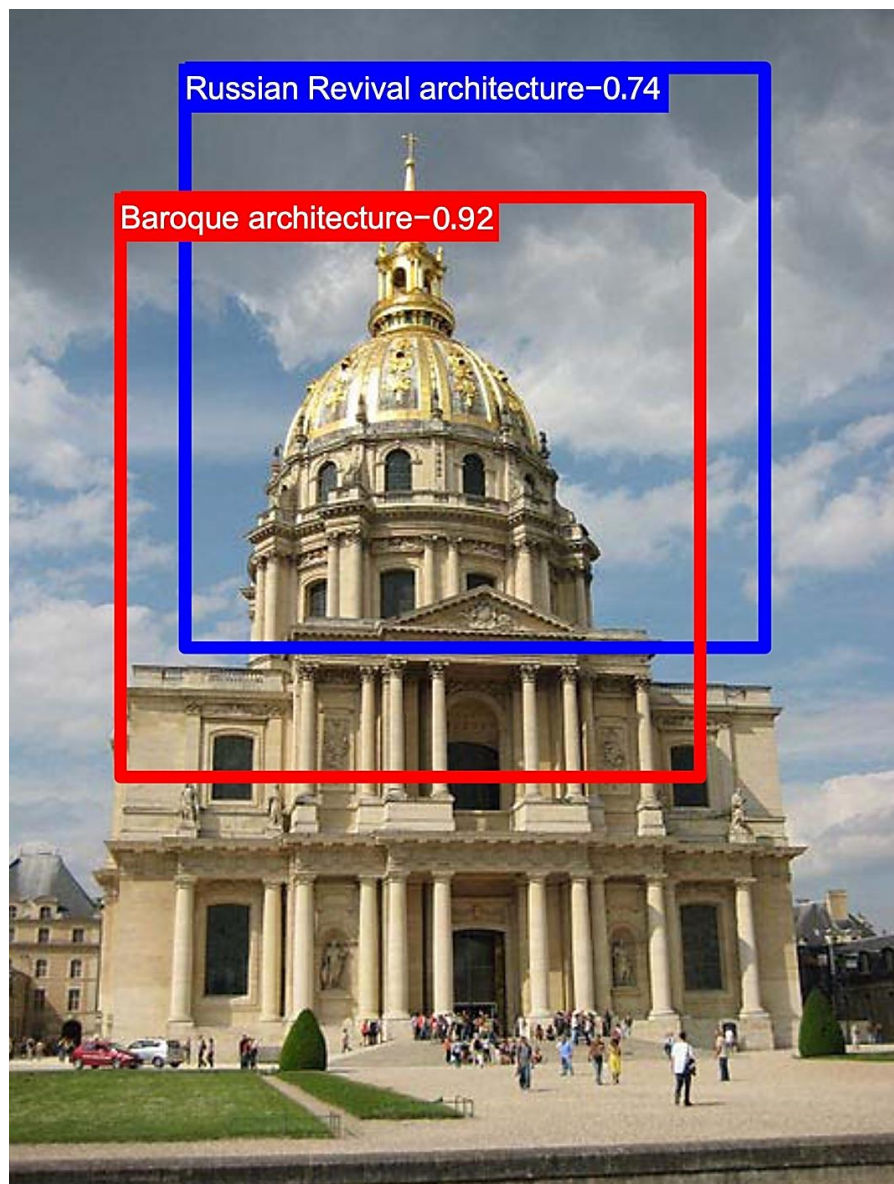


Рис. 2. Оценка точности разработанной модели сверточной нейронной сети
Fig. 2. Accuracy estimation of the proposed model of convolutional neural network

Выводы

Разработанная в рамках настоящей статьи модель сверточной нейронной сети для автоматизированного определения стиля архитектуры зданий позволила достичь точности, которая превосходит величину прецизионности базовой модели логистической регрессии.

Причины такого преимущества авторы статьи находят в выборе модели прикладного искусственного интеллекта: логистическая регрессия относится

к типу моделей машинного обучения, в то время как сверточная нейронная сеть является ярким представителем класса глубокого обучения.

Несмотря на разницу в точности, главной целью работы была разработка интеллектуального решения, которое могло бы автоматически определять архитектуру здания, загружаемого в модель в виде фотографии. В рамках настоящей статьи цель была достигнута при использовании более сложной модели искусственного интеллекта, однако это не означает остановку дальнейшей разработки других моделей. Напротив, представленная архитектура может быть усовершенствована другими исследователями, что позволит решать задачу определения стиля зданий ещё более точно и полно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wolpert D.H. Stacked generalization // *Neural networks*. 1992. V. 5. № 2. P. 241–259. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080\(05\)80023-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080(05)80023-1)
2. Kopec D. *Classic Computer Science Problems in Python*. Manning. Shelter Island. 2019. 206 p. ISBN 9781617295980.
3. Johansson R. *Numerical Python*. Apress, 2018. 488 p. DOI 10.1007/978-1-4842-0553-2
4. Wolohan J.T. *Mastering large datasets with Python*. Mannig Press. 2020. 312 p. ISBN 9781617296239.
5. Pratap Dangeti, Allen Yu, Claire Chung. *Learning path numerical computing with Python*. Packt Publishing. 2018. 682 p. ISBN 1789953634, 9781789953633.
6. Downey A., Elkner J., Meyers C. *How to Think Like a Computer Scientist*. Green Tea Press, 2002. 288 p. ISBN 0-9716775-0-6.

REFERENCES

1. Wolpert D.H. Stacked generalization. *Neural Networks*. 1992; 5 (2): 241–259. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080\(05\)80023-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080(05)80023-1)
2. Kopec D. *Classic computer science problems in Python*. Manning. *Shelter Island*. 2019. 206 p. ISBN 9781617295980.
3. Johansson R. *Numerical Python*. Apress Inc., 2018. 488 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-0553-2
4. Wolohan J.T. *Mastering large datasets with Python*. Manning Press. 2020. 312 p. ISBN 9781617296239.
5. Pratap Dangeti, Allen Yu, Claire Chung. *Learning path numerical computing with Python*. Packt Publishing. 2018. 682 p. ISBN 1789953634, 9781789953633.
6. Downey A., Elkner J., Meyers Ch. *How to think like a computer scientist*. Green Tea Press, 2002. 288 p. ISBN 0-9716775-0-6.

Сведения об авторах

Пылов Петр Андреевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Дягилева Анна Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Николаева Евгения Александровна, канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, nea.vtm@kuzstu.ru

Шалыгина Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shal53@mail.ru

Authors Details

Petr A. Pylov, Research Assistant, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya Str., 650000, Kemerovo, Russia.

Anna V. Dyagileva, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya Str., 650000, Kemerovo, Russia.

Evgeniya A. Nikolaeva, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyya Str., 650000, Kemerovo, Russia, nea.vm@kuzstu.ru

Tat'yana A. Shalygina, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shal53@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 22.05.2023
Одобрена после рецензирования 25.05.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 22.05.2023
Approved after review 25.05.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 45–56.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 45–56.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-45-56

EDN: QJHVKC

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ГОРОДСКИХ КВАРТАЛОВ КЕМЕРОВО ОТ МОМЕНТА ОСНОВАНИЯ ГОРОДА В 1918 ГОДУ ДО НАСТОЯЩЕГО ВРЕМЕНИ

Алеся Михайловна Ермолина

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В статье рассмотрена актуальная проблема, связанная с дальнейшим развитием и адаптацией исторических городов России к современным условиям на примере г. Кемерово.

Целью проводимого исследования является оценка изменений, происходящих с городскими кварталами Кемерово в процессе его развития от основания до современности. Периоды выбраны в соответствии с поэтапным появлением новых генеральных планов города.

Методология и методы исследования основываются на междисциплинарном подходе, применяемом для изучения архитектурно-планировочного развития г. Кемерово. В работе использован принцип историзма, который позволяет рассмотреть архитектурно-планировочное развитие в контексте эволюции определенных временных и пространственных границ. Сравнительный анализ дает возможность выделить основные хронологические периоды в развитии кварталов, проектные и планировочные решения.

Научная и практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов в исследованиях по изучению планировочного развития исторических городов, при выполнении проектов по реновации исторических территорий г. Кемерово, в работе по сохранению ценной историко-культурной среды города.

Результаты. На основе проанализированных данных были разработаны сводные табличные и графические материалы. В результате проведенного исследования были выявлены факторы, повлиявшие на рост кварталов, обозначены этапы развития городской застройки, а также определены возможные перспективы для дальнейшего развития и адаптации кварталов г. Кемерово.

Ключевые слова: Кемерово, квартал, генеральный план, адаптация, морфология городской застройки, градостроительство, застройка, проектирование населенных мест

Для цитирования: Ермолина А.М. Особенности трансформации городских кварталов Кемерово от момента основания города в 1918 году до настоящего времени // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 45–56. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-45-56. EDN: QJHVKC

ORIGINAL ARTICLE

**TRANSFORMATION OF CITY BLOCKS IN KEMEROVO
FROM 1918 UNTIL THE PRESENT****Alesya M. Ermolina***Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

Аннотация. *Purpose:* The aim of this work is evaluation of changes in city blocks in Kemerovo starting from its foundation until the present. The time intervals are chosen with stage-by-stage elaboration of the city overall plans.

Methodology: Interdisciplinary approach to studying the architecture and planning in Kemerovo. The historical method is used to consider the architecture and planning development during the evolution of temporal and spatial boundaries. The comparative analysis allows highlighting the main periods in the city block construction, design and planning solutions.

Research findings: Summary tables and drawings are developed in this work. Factors affecting the city block construction are determined herein as well as development stages of the urban environment, and future development and adaptation of city blocks in Kemerovo.

Practical implications: The obtained results can be used to study planning of historical cities, carry out renovation projects of historical places in Kemerovo, preserve historical culture of the city.

Keywords: Kemerovo, city block, overall plan, adaptation, urban development morphology, urban planning, conglomeration design

For citation: Ermolina A.M. Transformation of city blocks in Kemerovo from 1918 until the present. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (4): 45–56. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-45-56. EDN: QJHVKC

Введение

Сегодня проблема развития и адаптации к современным условиям исторических городов России является весьма актуальной. Проведено исследование исторического развития г. Кемерово, выявлены особенности формирования и дальнейшей адаптации его городских кварталов от момента основания до современности. Периоды выбраны в соответствии с поэтапным появлением новых генеральных планов города. Изучены факторы, повлиявшие на изменение морфологии городской застройки.

Исследование, представленное в статье, опирается на научные труды и работы И.В. Захаровой, В.Г. Залесова, О.С. Ворониной, Н.С. Головань, Л.И. Донбая, Вольфа Д. Прикса по истории архитектуры и градостроительства, истории формирования и развития российских городов, творчество архитекторов, а также на открытые официальные и архивные источники.

Целью проводимого исследования является оценка изменений, происходящих с городскими кварталами в процессе развития Кемерово от основания до современности.

Задачи исследования: выявление границ и габаритов городских кварталов, анализ их структуры, взаимодействие квартала с окружающей застройкой, а также влияние технологий, исторических процессов и прочих факторов на планировочную структуру квартала. Кроме того, в ходе исследования были разработаны сводные графические материалы.

За период своего формирования г. Кемерово (до 1932 г. – Щегловск) претерпел ряд кардинальных изменений. Благодаря развитию угледобычи в окрестностях современного города, Кемерово немного больше чем за сто лет прошел путь от небольшого шахтерского села до современного, интенсивно развивающегося города – столицы угольного региона Кузбасса.

На сегодняшний день в Кемерово принят новый генеральный план, разработанный на период до 2035 года². В соответствии с планом работы по обновлению городской среды активно ведутся в разных частях города. Так, в историческом центре в устье р. Искитимки возводится кластер искусств с современным комплексом зданий филиала Мариинского театра (архитектор Вольф Прикс) [1]. Вдоль русла р. Томи на свободных территориях возводятся многофункциональные спортивные комплексы, учебные заведения и современные жилые дома. Безусловно, все эти изменения активно влияют на градостроительную ситуацию. Вокруг новых объектов формируется среда – закладываются новые парки, скверы, ведется строительство современных магистралей [2].

Однако появление в городе нового приводит и к изменению существующей окружающей среды. Близлежащие кварталы постепенно начинают меняться, адаптироваться к новым взаимосвязям. Так, сегодня в Кемерово активно ведутся работы по реновации крупного участка в географическом центре города – расширение одной из крупнейших дорожных артерий – ул. Сибиряков-Гвардейцев и близлежащих кварталов малоэтажной застройки и инфраструктуры.

Ввиду таких изменений стоит рассмотреть и проанализировать изменения кварталов Кемерово в периоды его развития, связанные с принятием обновленных генеральных планов города.

Методы исследования

Объектом исследования были выбраны характерные кварталы городской застройки по периодам, связанным с принятием обновленных генеральных планов Кемерово. В частности, были рассмотрены планы 1918, 1932, 1948, 1968, 1993 гг. и современные.

В ходе исследования применялись методы историзма и пофакторной оценки городских кварталов, основывающиеся на архитектурном и градостроительном анализе. Были выявлены и структурированы особенности кварталов – плотность застройки, наличие озеленения внутри квартала или же его доступность, отношение площади квартала к его средней этажности, архитектурная ценность застройки, кроме того, был проведен анализ комфортности проживания в каждом типе квартала и экологической составляющей.

Все полученные данные были структурированы в таблицы для удобства дальнейшей работы. Также на основе данных был разработан сводный план-схема г. Кемерово с указанием границ кварталов в соответствии с периодами развития.

² В Кемерово появится новый генеральный план. Бизнес-портал Кузбасса. URL: <http://goldenkey.kgr.ru/news/101019.html> (дата обращения: 25.01.2023).

Материалы исследования

В 1918 г. на конкурсе проектов генерального плана Щегловска (с 1932 г. – Кемерово) был представлен план города инженера П.А. Парамонова. По замыслу автора, Щегловск должен был стать городом-садом на левом берегу р. Томи. Идея города-сада была заимствована Парамоновым из практики зарубежных архитекторов, в частности Э. Говарда [6]. Планировочная схема Щегловска предполагалась смешанного типа: прямоугольная с диагоналями и радиальными магистралями. Размер усадеб (именно усадьба была принята главной мерной единицей города – из усадеб формировались кварталы Щегловска) колебался от 600 до 1000 кв. м. Ширина улиц должна была составлять не менее 30 м, а озеленение внутри кварталов должно было занимать большую часть территории. Общая площадь городских земель составляла около 3500 десятин земли – примерно 3800 га [7].

Частично такая разбивка кварталов была выполнена в районе современных улиц Кузнецкий проспект, Дзержинского, Ленина, в районе, расположенном западнее современного железнодорожного вокзала. Несмотря на то, что план Парамонова достаточно долгое время был основным документом, определявшим развитие города, пропорции кварталов, а главное, процентное соотношение озеленения в них изменялись в угоду реальности. Если границы и пропорции сетки улиц ещё прослеживались на плане города, то озеленение было значительно урезано в пользу жилых и общественных построек³.

В 1932–1934 гг. на смену плану инженера Парамонова пришёл проект генерального плана Кемерово на 165 тыс. жителей, выполненный Э. Маем (проектно-планировочное бюро Цекомбанка). В 1935–1936 гг. была осуществлена его корректировка на 450 тыс. жителей Горстройпроектом в Новосибирске. По генплану 1932–1934 гг. городские кварталы кардинально меняют свои пропорции и наполнение (рис. 1).

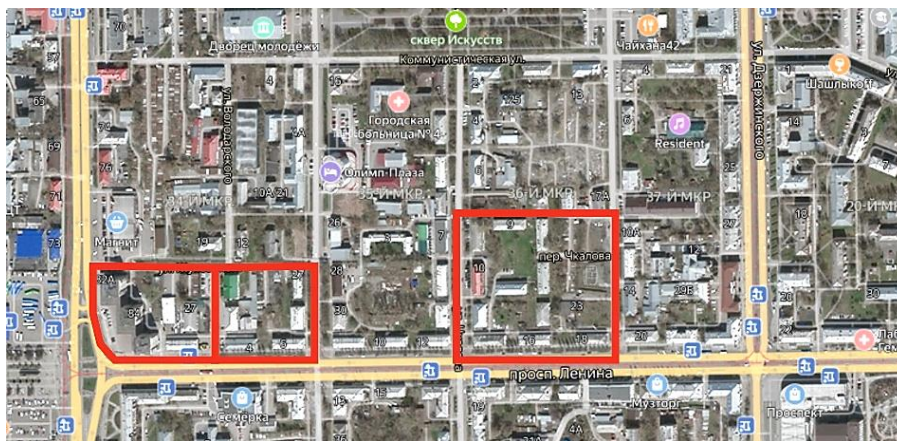


Рис. 1. Кварталы, сформировавшиеся в 30-х гг. XX в.
Fig. 1. City blocks developed in the 1930s

³ Здесь будет город-сад! История и современность одной градостроительной концепции. URL: <http://www.novate.ru/blogs/040514/26245/> (дата обращения: 25.01.2023).

На современном плане города кварталы этого периода отчётливо прослеживаются в районе так называемого Соцгорода (вдоль пр. Ленина от современного железнодорожного вокзала по направлению к ул. Дзержинского). Кварталы изменяют свою морфологию – они становятся крупнее, здания парадными фасадами формируют границы кварталов, замыкая внутри себя территории, отведенные под зелёные насаждения, подсобные постройки. Средние размеры кварталов вырастают до 250×170 м и площади в 4,25 га. Застройка перестаёт быть индивидуальной, появляется многоэтажная застройка в 2–4 этажа, дома образуют ансамбли [3]. Здания этого периода постройки имеют высокую архитектурную ценность, многие признаны памятниками регионального значения. Процент озеленения внутри кварталов снижается, парковые зоны выносятся на отдельные территории в пределах микрорайонов. В этот период в городе сформировались скверы и парки центрального района.

Следующим этапом, повлиявшим на сетку городских кварталов, стал период расцвета ансамблей в Кемерово 1940-х гг. Крупные помпезные здания, выполненные архитекторами Д.Ф. Зениным, С.П. Сколбевым, В.Р. Цебелем, И. Белоусовичем, П. Кушнаревым, Н.Н. Текутовым и др., сформировали современный центр города. Дома на так называемом Притомском участке объединили в себе мелкую разбивку кварталов проекта Парамонова, сформировали основные улицы и бульвары городского центра [5]. Возросшая этажность порядка 5 этажей позволила выделить площади внутри кварталов под дворовые территории с озеленением (рис. 2). Впоследствии многие дворовые пространства были заполнены постройками более поздних периодов. Произошло уплотнение застройки в пределах существующих кварталов. Это негативным образом повлияло на процент озеленения.

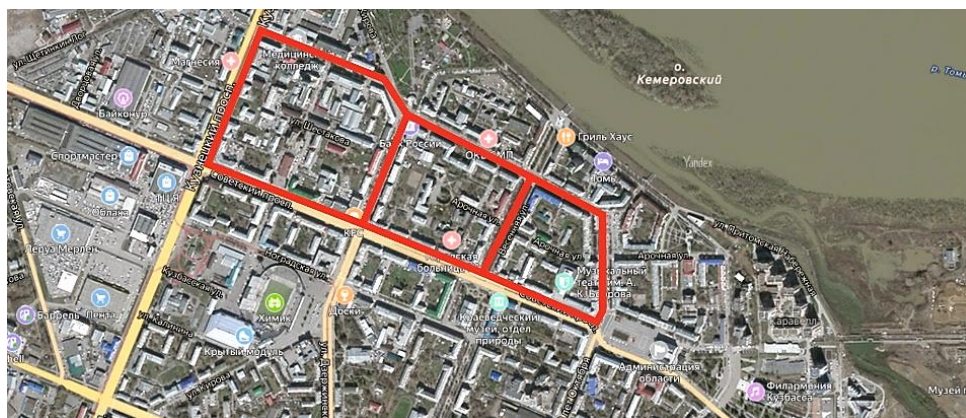


Рис. 2. Кварталы, сформировавшиеся в 40-х гг. XX в.

Fig. 2. City blocks developed in the 1940s

На нарезку кварталов исторического центра и рядом расположенных территорий резко повлиял период эвакуации людей и предприятий в годы Великой Отечественной войны [4]. Предприятия, перенесенные в город, заняли значительные площади внутри сетки городского плана. Отчетливо это влияние прослеживается на генеральном плане 1948 г.

В 1960-е гг. трест «Кемеровожилстрой» открывает в городе завод крупнопанельного домостроительства, что стало знаковым событием для Кемерово 1957 г. К 1965 г. 70 % строящегося в Кемерово жилья было выполнено по этой технологии [10]. Растет этажность, на первые этажи жилых домов выносятся учреждения социального и культурно-бытового обслуживания. Все это влечет за собой изменение характеристик городских кварталов – теперь человек получает все необходимое для жизни внутри достаточно замкнутой территории (рис. 4). Однако наличие одних благ рядом исключает наличие других – так парковочные площадки личного транспорта, бытовые постройки (погреб, гаражи) вытесняют за пределы кварталов крупные очаги озеленения. Скверы внутри жилой застройки минимизируются, а парки выносятся на границы микрорайонов, образуя линейные структуры. Они становятся более крупными, но при этом более удалёнными от жилья. В среднем один парк (а чаще бульвар) приходится на территорию застройки в 2–4 га. При этом средний путь человека от места жительства до места отдыха занимает 1000 м. Наиболее наглядно эти изменения прослеживаются в восточной части города, в самом молодом Ленинском районе (рис. 4).



Рис. 4. Кварталы, сформировавшиеся в 60-х гг. XX в. Зеленым цветом выделено линейное озеленение

Fig. 4. City blocks developed in the 1960s. Green lines indicate linear planting

В начале 1990-х гг. градостроители приступили к разработке нового генерального плана Кемерово. По сути новый генеральный план был корректировкой плана 1969 г. Разработку плана вели в Москве, в Гипрогоре. Особенностью задания было развитие города в пределах уже существующей городской среды, а все близлежащие и пустующие территории рассматривались лишь как перспективные. Но если город не мог расти в стороны, то он рос внутрь. Территории внутри кварталов 1980–90-х гг. подверглись ещё большему уплотнению в угоду транспорту и бытовой застройке (строительство крупных магазинов внутри кварталов). На этом этапе озеленение города сводится к минимуму.

Если рассмотреть современный период развития Кемерово, то можно отметить небольшой прирост в размерах кварталов относительно застройки 80–90-х гг. XX в. (рис. 5). Однако происходит изменение наполнения кварталов. Повышается этажность, намечается тенденция выноса парковочных мест либо за границы застройки, либо в подземную часть, хотя они и по-прежнему занимают значительную территорию внутри кварталов. Кварталы становятся многоуровневыми. Плотность озеленения незначительно, но все же повышается, в непосредственной близости от жилых домов разбиваются небольшие скверы, зоны отдыха взрослых и детей. Происходит реконструкция территории, где историческая застройка встречается с современной. Нередко свободные территории превращаются в линейные парки. Закладка новых районов происходит сразу с учётом территорий, отводимых под зелёные зоны.

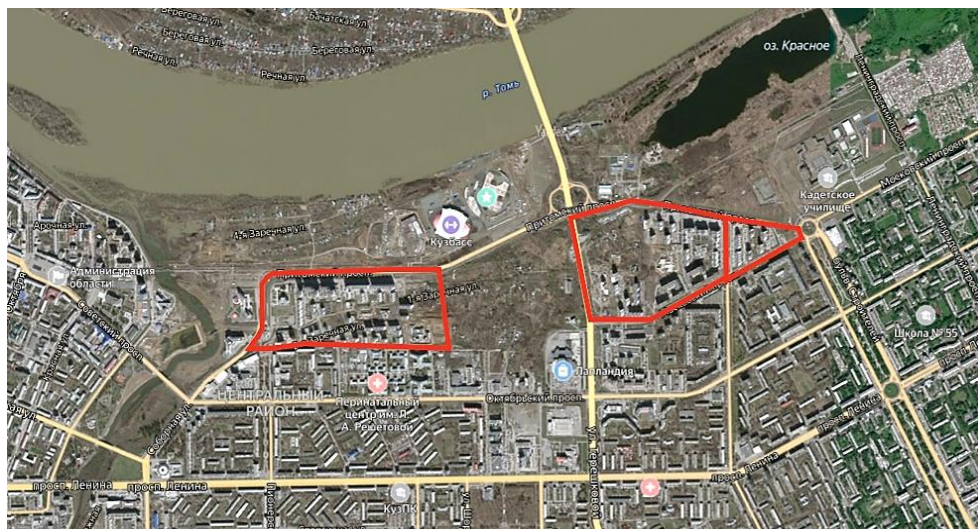


Рис. 5. Современные кварталы Кемерово
Fig. 5. Modern city blocks in Kemerovo

Результаты и выводы

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что параллельно с развитием города размеры кварталов Кемерово увеличиваются (рис. 6), однако меняется их наполнение, а также соотношение процента застройки, озеленения, подсобных территорий. Отчётливо эти изменения видны в таблице.

Можно выделить несколько вариантов адаптации исторических кварталов Кемерово к требованиям современности.

В первом чаще всего происходит уплотнение застройки внутри уже сложившегося квартала – внутри исторического центра города вырастают новые, нередко внешне выделяющиеся объекты. При этом снижается комфорт проживания, страдает экология – территория, отведенная под озеленение, активно застраивается, не оставляя места для заложения новых очагов озеленения.

**Квартальная застройка Кемерово
по периодам появления новых генеральных планов**
City block construction in Kemerovo according to overall plan development

Параметры	1918 г.	1932 г.	1948 г.
Размеры квартала (в среднем)	150×150 м	250×170 м	350×450 м
Площадь	22 500 кв. м/2,25 га	42 500 кв. м/4,25 га	157 500 кв. м/15,7 га
Этажность	1–2	2–4	3–5
Относительное озеленение	Озеленение за счет приусадебных участков	Внутриквартальные скверы, занимающие до половины площади квартала	Внутриквартальные скверы, занимающие до 1/3 квартала, парки в пешеходной доступности порядка 500 м
Количество зданий (жилых) внутри квартала	10–20 (в зависимости от площади приусадебного участка)	6–10	6–10
Наличие школ и ДДУ внутри квартала	Вынесены в отдельные кварталы	Вынесены в отдельные кварталы	ДДУ внутри некоторых кварталов, школа на несколько кварталов

Окончание таблицы
End of table

Параметры	1968 г.	1993 г.	Наше время
Размеры квартала (в среднем)	350×460 м	700×580 м	1500×600 м
Площадь	161 000 кв. м/16 га	406 000 кв. м/40,6 га	900 000 кв. м/90 га
Этажность	5–7	5–16	До 25
Относительное озеленение	Внутриквартальные скверы, занимающие незначительную часть квартала, парки в пешеходной доступности порядка 800 м	Внутриквартальное озеленение скудное, крупные (в основном линейные) парки, бульвары находятся на расстоянии до 1000 м	Внутриквартальное озеленение скудное, однако в пределах кварталов находятся скверы или кварталы выходят на естественные массивы зелени (реку, бор)
Количество зданий (жилых) внутри квартала	10–15	20–30	30 и более
Наличие школ и ДДУ внутри квартала	ДДУ внутри квартала, школа на несколько кварталов	ДДУ внутри квартала, школа на 2–4 квартала	Несколько ДДУ на квартал, школа внутри квартала

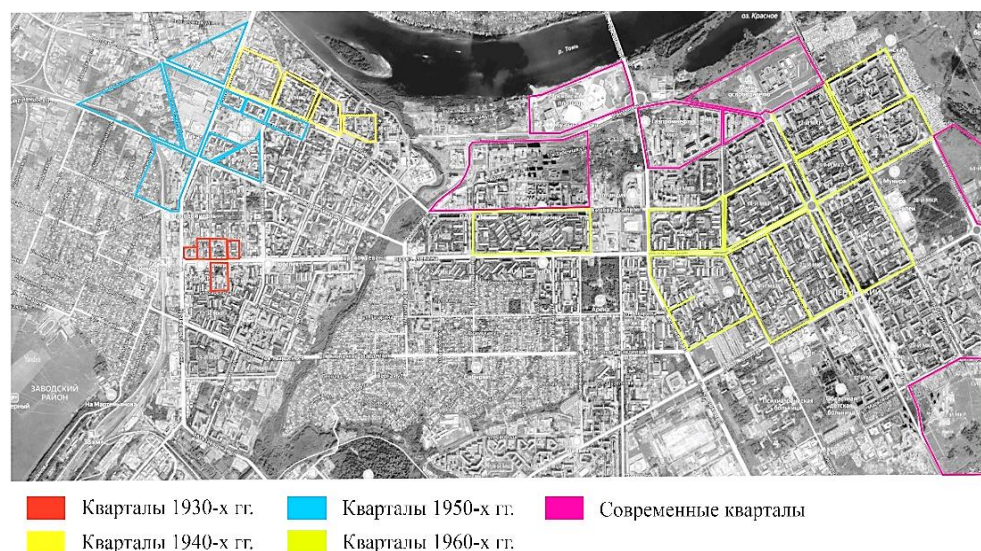


Рис. 6. Сводная карта-схема г. Кемерово с выделением кварталов разных периодов
 Fig. 6. Summary layout of Kemerovo with city blocks over the years

Второй вариант – реконструкция и объединение в более крупные объемы. Например, в западной части города (район Соцгорода) мелкие очаги малоэтажной застройки реконструируются, объединяются в более крупные образования. Наиболее ярко такие изменения сегодня наблюдаются в районе ул. Сибиряков-Гвардейцев – малоценная застройка уступает место современным высотным комплексам [8].

Третий вариант – это процесс реновации – реставрации района без разрушения целостности его структуры. Такой подход оправдывает себя там, где кварталы образованы ценной застройкой (памятниками архитектуры). Например, ансамблевую архитектуру исторического центра Кемерово можно сохранять путем изменения функции построек – жилые дома выводятся из частных рук и трансформируются в учреждения культуры, искусства, предпринимательства.

Какой бы вариант адаптации ни был выбран на сегодняшний день, основной задачей современных архитекторов и градостроителей является сохранение облика города, его масштабности, комфортности. Поэтому при любом современном строительстве следует учитывать не только необходимость получения нового микрорайона, но и то, как этот район впишется в морфологию города, насколько положительно повлияет на его дальнейшее развитие, решит проблемы озеленения, доступности, визуально облагородит город.

На основе проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Строительство новых кварталов и развитие городской территории оказывает непосредственное влияние на существующие исторические кварталы Кемерово. Близлежащие кварталы постепенно начинают меняться, адаптироваться к новым взаимосвязям.

2. Изменение квартальной застройки связано, прежде всего, с развитием технологий строительства и потребностями населения. Эти изменения несут

в себе как негативный, так и позитивный характер, в зависимости от выбранного метода внесения изменений.

3. На примере достаточно молодого г. Кемерово можно четко отследить этапы развития городского квартала в XX в.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wolf D. Prix. Stuart Weitzman School of Design. URL: <https://www.design.upenn.edu/people/wolf-d-prix> (дата обращения: 31.01.2023).
2. Вольф Д. Прикс. Архитекторы разучились думать о будущем. Проект Россия. URL: <https://prorus.ru/interviews/volf-dpriks-arhitektory-razuchilis-dumat-o-budushchem/> (дата обращения: 25.01.2023).
3. Головань Н.С. Генеральные планы и их реализация в городах Кузбасса (30–50-е гг. XX в.). URL: <http://pandia.ru/text/77/217/3878.php> (дата обращения: 20.12.2022).
4. Город Кемерово в годы Великой Отечественной войны : материалы научной конференции 14 апреля 2000 г. / Кемеровский государственный университет ; Кузбасское отделение Академии военно-исторических наук. Кемерово : Кузбассвуиздат, 2000. 155 с.
5. Донбай Л.И. Кемпроект // Строим Кузбасс / сост. М.А. Титова. Кемерово : Книжное изд-во, 1984. 420 с.
6. Залесов В.Г., Воронина О.С., Кожуркова Т.Б. Город-сад в Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 22–35.
7. Захарова И.В. Искусство пропорций. Отражение новаторских поисков стиля Современного движения в жилищной архитектуре 1920-х годов в Кемерово // Красная Горка. Вып. 3. Кемерово : Кузбассвуиздат, 2002. С. 26–33.
8. Тельтевский И. Генеральный план Кемерово-2032. Как будет выглядеть город в будущем? Сибдепо : Кемерово. URL: <https://sibdepo.ru/reading/genplan-keмерово-2032.html> (дата обращения: 23.01.2023).
9. Косенкова Ю.Л. Советский город 1940-х – первой половины 1950-х годов. От творческих поисков к практике строительства. 2-е изд., доп. Москва : ЛИБРОКОМ, 2009. 440 с.
10. Соковец Е.С. История застройки г. Кемерово 1930–60-х гг. // Культура и искусство: поиски и открытия. 2010. С. 59–63.

REFERENCES

1. Wolf D. Prix. Stuart Weitzman School of Design. Available: www.design.upenn.edu/people/wolf-d-prix (accessed December 31, 2023).
2. Wolf D. Prix. Architects have forgotten how to think about the future. Available: <https://prorus.ru/interviews/volf-dpriks-arhitektory-razuchilis-dumat-o-budushchem/> (accessed January 25, 2023). (In Russian)
3. Golovan' N.S. Implementation of overall plans in Kuzbass (1930–50s). Available: <http://pandia.ru/text/77/217/3878.php> (accessed December 20, 2023). (In Russian)
4. Proc. Sci. Conf. 'The city of Kemerovo during the Great Patriotic War', April 4, Kemerovo State University. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2000. 155 p. (In Russian)
5. Donbaj L.I. Kemproekt. Kemerovo, 1984. 420 p. (In Russian)
6. Zalesov V.G., Voronina O.S., Kozhurkova T.B. Garden City in Tomsk. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2015; (4): 22–35. (In Russian)
7. Zaharova I.V. The art of proportion. Reflection of innovative search for the modern architecture style of the 1920s in Kemerovo. Krasnaya Gorka. Issue 3, Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2002. Pp. 26–33. (In Russian)
8. Tel'tevskii I. Kemerovo overall plan 2032. What will the city look like in the future? Sibdepo: Kemerovo. Available: <https://sibdepo.ru/reading/genplan-keмерово-2032.html> (accessed January 23, 2023). (In Russian)
9. Kosenkova Yu.L. The Soviet city in the 1940–50s. From creative process to practice in construction, 2nd ed. Moscow: LIBROCOM, 2009. 440 p. (In Russian)
10. Sokovetz E.S. The history of Kemerovo development in the 1930–60s. In: Culture and art: Search and discovery. 2010. Pp. 59–63. (In Russian)

Сведения об авторе

Ермолина Алеся Михайловна, преподаватель, Институт развития города Севастопольского государственного университета, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, alesya.ermolina@mail.ru

Author Details

Alesya M. Ermolina, Lecturer, Sevastopol State University. 33, Universitetskaya Str. 299053, Sevastopol, Russia, alesya.ermolina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.03.2023
Одобрена после рецензирования 15.06.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 13.03.2023
Approved after review 15.06.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 57–70.

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 (4): 57–70.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 711.25(911.6)

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-57-70

EDN: QNPBSD

РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ МИКРОМОБИЛЬНОСТИ В ГОРОДЕ КАЗАНИ

Светлана Харисовна Исмагилова¹, Елизавета Дмитриевна Горшкова²,
Елена Александровна Залетова¹

¹Казанский государственный

архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

²Фонд пространственных данных Республики Татарстан, г. Казань, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Наблюдаемый в последнее время взрывной рост числа средств индивидуальной мобильности, особенно в крупных городах, обострил проблему неприспособленности транспортно-пешеходной инфраструктуры к подобного рода движению. В связи с этим приобретает особую актуальность разработка градостроительных стратегий для полноценной интеграции нового вида мобильности в систему движения на урбанизированных территориях.

Цель настоящего исследования заключается в выработке градостроительных рекомендаций по формированию инфраструктуры микромобильности для г. Казани и реализации проектных решений по её развитию.

Основные результаты исследования состоят в проведении комплексного анализа градостроительных условий, направленного на выявление особенностей, определяющих формирование инфраструктуры микромобильности в городе. Авторами определена специфика планировочной организации сети микромобильности в различных градостроительных зонах Казани. Выявлены границы и дислокация сети микромобильности города, определены её планировочные особенности и разработаны приемы формирования инфраструктуры.

Впервые выработаны градостроительные рекомендации по развитию инфраструктуры микромобильности Казани, что определяет особую значимость результатов настоящего исследования.

Ключевые слова: микромобильность, велотранспортная инфраструктура, модель, средства индивидуальной мобильности, градостроительная система

Для цитирования: Исмагилова С.Х., Горшкова Е.Д., Залетова Е.А. Развитие инфраструктуры микромобильности в городе Казани // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 57–70. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-57-70. EDN: QNPBSD

ORIGINAL ARTICLE

DEVELOPMENT OF MICROMOBILITY INFRASTRUCTURE
IN KAZANSvetlana Kh. Ismagilova¹, Elizaveta D. Gorshkova², Elena A. Zaletova¹¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia²Spatial Data Fund of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

Abstract. The dramatic growth in personal mobility devices, especially in large cities, determines inadequacy of transport and pedestrian infrastructure. In this regard, it is necessary to develop the urban planning policy for a complete integration of a new type of mobility in the traffic system in urbanized territories.

Purpose: The development of urban planning recommendations for the formation of micromobility infrastructure for Kazan and the project implementation for the city development.

Research findings: All-round analysis of urban planning conditions to determine the formation of the micromobility infrastructure in the city. Determination of the structural organization of the micromobility network in urban planning zones in Kazan.

Value: The urban planning recommendations are given for the development of the micromobility infrastructure in Kazan. Boundaries and dislocation of the micromobility network are identified for the city. Planning and infrastructure formation techniques are proposed herein.

Keywords: micromobility, bike transport infrastructure, model, personal mobility device, urban planning system

For citation: Ismagilova S.Kh., Gorshkova E.D., Zaletova E.A. Development of micromobility infrastructure in Kazan. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 57–70. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-57-70. EDN: QNPBSD

Введение

Комфортные условия для жизнедеятельности населения в мегаполисах существенным образом зависят от качества организации транспортно-пешеходной инфраструктуры, обеспечивающей взаимосвязь между основными элементами города и существенное сокращение затрат времени на преодоление расстояний. Основной упор на развитие транспортной инфраструктуры, главным образом ориентированной на активно распространяющееся автомобильное движение, привел к множеству негативных последствий – экологическому дискомфорту, ограничению пешеходного перемещения, неразвитости общественного транспорта и гипертрофии пространств, предназначенных для дорожного движения и автомобильных стоянок.

В качестве альтернативы, направленной на преодоление отмеченных выше противоречий, явились концептуальные и проектные решения, ориентированные на создание дружелюбной городской среды с преимущественным пешеходным и велосипедным движением и общественным транспортом. Одним из новых направлений развития внутригородского движения становится интенсивно распространяющееся использование разнообразных средств индивидуальной мобильности, которые благодаря экономичности, доступности, экологичности, маневренности, неприхотливости в обслуживании и простоте

в управлении способствуют уменьшению числа транспортных средств внутри города и сокращению пробок.

Однако, как показала отечественная практика, безопасность движения с использованием средств индивидуальной мобильности и велосипедов в должной мере не обеспечивается ввиду отсутствия соответствующей инфраструктуры, а именно: выделения коридоров для движения, стоянки, хранения и обслуживания, логистической стыковки с другими видами транспорта и пр. Для реализации всех вышеперечисленных требований очевидна необходимость разработки и внедрения комплекса архитектурно-планировочных мероприятий для полноценной интеграции объектов инфраструктуры микромобильности в городскую среду.

Проблема развития инфраструктуры микромобильности актуальна и для Казани, где на фоне растущей автомобилизации (на 2021 г. 355,5 маш. на 1 тыс. жит.) отмечается значительное расширение использования различных средств индивидуальной мобильности в структуре городского трафика. Однако город пока остается неприспособленным для новых видов передвижения, создающих помехи как автодвижению, так и пешеходам, в связи с недостаточной разработанностью «правил пользования» и отсутствием планировочных решений по адаптации сложившейся дорожной инфраструктуры к новым условиям.

Объект исследования – особенности градостроительного формирования системы микромобильности в Казани.

Теоретическую основу исследования составляют труды российских и зарубежных ученых: М.Я. Блинкина, В. Вучика, В.Л. Глазычева, В.А. Сосновского, Г.А. Малояна, Я.Гейла.

Изучены работы, в которых представлены требования к созданию велотранспортной инфраструктуры города [1, 2, 3]. Проанализированы современные тенденции архитектурно-планировочных и инженерных решений проектирования инфраструктуры микромобильности в различных странах (Нидерланды (Амстердам), Канада (Китченер, Калгари), Дания (Копенгаген), США (Мичиган), Германия). Рассмотрено современное состояние развития инфраструктуры микромобильности в нашей стране [4, 5, 6, 7], а также есть ряд публикаций, раскрывающих экономические, экологические, социальные факторы развития инфраструктуры для велотранспорта и микромобильности¹ [8, 9].

Проанализированы работы, направленные на создание велотранспортной инфраструктуры в Казани. Среди них исследование, показывающее повышение эффективности транспортных систем города с учетом внедрения перспективной схемы велодвижения [10], а также концептуальное предложение по развитию велосипедной инфраструктуры, разработанной транспортным бюро г. Казани в 2020 г. [11].

Ключевым определением, используемым в работе, принято понятие «микромобильность», означающее передвижение на короткие расстояния на компактных транспортных средствах, таких как моноколесо, электросамокат и прочие средства индивидуальной мобильности (СИМ) и велотранспорт.

¹ Исследование международного опыта оценки и мониторинга эффектов от мер по развитию пешеходной и велосипедной среды и принятия решений по городской политике экомобильности // Центр городских исследований СКОЛКОВО, 2016.

Классификация средств микромобильности, предложенная Международным транспортным форумом, основана на максимальной скорости и весе транспортного средства.

Цель исследования – выработка градостроительных рекомендаций по формированию инфраструктуры микромобильности в г. Казани путем интеграции её в градостроительную систему города.

Задачи:

- провести комплексный анализ транспортно-градостроительной системы г. Казани;
- на основе проведения комплексного анализа выявить особенности градостроительных условий формирования сети микромобильности в городе;
- предложить размещение сети микромобильности Казани и приемы формирования её инфраструктуры на примере основных видов городских маршрутов.

Материалы и методы

Методика исследования построена на системном подходе и включает:

- обобщение отечественного и зарубежного опыта проектирования и эксплуатации инфраструктуры микромобильности, изучение и систематизацию теоретических и литературных источников, позволившие выявить современные тенденции в области их градостроительного формирования;
- натурное и дистанционное исследование территорий, выделенных для средств микромобильности в Казани, сбор и изучение картографических материалов, позволившие собрать сведения для последующего анализа по отдельным территориям и объектам;
- функционально-пространственное и логическое моделирование, позволившее представить планировочную сеть микромобильности Казани, а также приемы формирования инфраструктуры.

Материалами исследования выступали документы территориального планирования МО город Казань; материалы «Концепции развития велосипедной инфраструктуры» для Казани 2020 г.; нормативные документы регламентирующего характера, определяющие требования к движению средств малой мобильности, главным образом велосипедистов, и к проектированию пешеходных и велосипедных дорожек.

Результаты

В качестве отечественного опыта формирования системы микромобильности была рассмотрена практика проектирования сети веломаршрутов для Москвы, Новосибирска, Альметьевска. Было выявлено, что культура данного вида городского движения находится на начальной стадии освоения. Внедрение проектных схем носит фрагментарный характер, не учитывается стремительное увеличение разнообразных средств микромобильности и характер их использования² [12].

² Руководство по созданию быстровозводимой велосипедной инфраструктуры. Москва, 2020. URL: <https://smarteka.com/practices/rukovodstvo-po-sozdaniu-byistrovozvodimoj-velosipednoj-infrastruktury?tab=resource> (дата обращения: 23.05.22).

Из зарубежного опыта рассмотрена практика формирования велотранспортной инфраструктуры в таких странах, как Нидерланды, Дания, Канада, Германия. Данный вид внутригородского движения широко развит и отличается продуманным планировочным размещением веломаршрутов, организацией комфортных и охраняемых велопарковок рядом с местами притяжения, удобной системой велопроката и сервиса, обеспечением преимуществ в правах дорожного движения и пр. [13].

Анализ мирового опыта позволил выявить ряд общих требований, которые следует учитывать как при оценке, так и при формировании сети и инфраструктуры микромобильности [14, 15]:

- обеспечение безопасности движения средств индивидуальной мобильности (СИМ) как путем уменьшения интенсивности и скорости движения, так и пространственным их обособлением от автомобиля;
- прямолинейность и непрерывность, определяющие возможность создания наиболее короткого пути перемещения для СИМ и велосипедов;
- связность, означающая возможность создания специальной сети маршрутов для СИМ и велосипедов, охватывающих город и беспрепятственно соединяющих различные пункты назначения, а также связанных с другими транспортными сетями;
- привлекательность и удобство, обеспечиваемые полноценной интеграцией инфраструктуры микромобильности в городское окружение.

Разработанная в 2020 г. транспортным бюро г. Казани «Концепция развития велотранспортной инфраструктуры», предусматривающая создание веломаршрутной сети протяженностью 75 км, основана на интеграции её в существующую дорожно-транспортную систему города без изменений, с учетом существующих велодорожек и расположения проектируемых станций велопроката. Предложение предусматривает организацию связей через р. Казанку по существующим автомобильным мостам (Кировская и Кремлевская дамбы, мост Миллениум и Третья транспортная дамба). Однако концепция велосипедного движения в городе пока не обрела полноценного включения в транспортную инфраструктуру и существует в виде разрозненных участков, что требует осуществления целого комплекса мероприятий функционально-планировочного и технического характера.

С целью разработки предложений по планировочной интеграции сети и инфраструктуры микромобильности в городскую систему был проведен комплексный анализ градостроительных условий Казани по следующим группам факторов:

- функционально-планировочным, включающим оценку функционально-пространственной структуры города, размещения объектов притяжения, морфологических особенностей застройки;
- транспортно-технологическим, включающим оценку структуры и параметров улично-дорожной сети, структуры пассажиропотока, внедрения новых технологических решений.

Разделение города руслом р. Казанки на два крупнейших планировочных района является заметной особенностью исторически сложившейся функционально-пространственной структуры Казани. Удовлетворение требований «связ-

ности» и «непрерывности» указывает на необходимость организации комфортных связей между планировочными районами города посредством существующих автомобильных мостов. Однако имеющиеся мостовые связи не приспособлены для безопасного и комфортного движения велосипедов и СИМ, не обладают требуемыми инфраструктурными качествами и нуждаются в осуществлении ряда мероприятий планировочного и технического характера.

В пределах планировочных районов создание сети маршрутов микро-мобильности зависит от размещения узлов притяжения, которые распределяются неравномерно и представляют собой полицентрическую структуру. Наибольшую плотность места притяжения обнаруживают в исторической части Вахитовского района, где сосредоточены культурные, исторические, торгово-развлекательные, деловые объекты, места приложения труда, а также значительно сконцентрированы маршруты общественного транспорта. Следует отметить, что для данного района города характерно активное развитие пешеходных коммуникаций различного типа – туристических, рекреационных, деловых, связанных с особенностями пространственного распределения точек притяжения. Геометрически схему распределения узлов притяжения в данном районе города можно определить как «линейно-узловую», характеризующуюся совмещением мест притяжения и транспортно-пешеходной сети коммуникаций. Исторический центр, рассчитанный в большей мере на пешеходные сообщения, не обладает территориальными резервами для развития сети коммуникаций для СИМ и велосипедов. Кроме того, он окружен свободными прибрежными зонами рек Волги и Казанки, которые являются важным территориальным ресурсом для распространения рекреационных и туристических маршрутов для средств микро-мобильности.

В других районах Казани, в так называемой срединной зоне города, места притяжения размещены более разрозненно и сосредоточены главным образом близ крупных торговых и рекреационных объектов. В отличие от исторического центра, данные районы не обладают столь существенным туристическим и культурным потенциалом, но имеющиеся зоны притяжения являются привлекательными для местного населения с точки зрения развития коммуникаций рекреационного и делового характера. Геометрию схемы распределения мест притяжения здесь можно охарактеризовать как «узловую», характеризующуюся относительно протяженными, свободными от функциональной нагрузки коммуникациями, связывающими между собой центры притяжения. Для районов срединной зоны города, не испытывающих недостатка пространственных ресурсов для микро-мобильности, активное развитие данного вида движения может быть использовано достаточно широко для различных целей – деловых, рекреационных, а также для обеспечения транспортной связности узлов притяжения нескольких территориальных уровней города.

Оценка существующей транспортной схемы г. Казани позволила выявить магистральные направления и улицы, по которым возможно осуществить прокладку сети микро-мобильности по основным направлениям, обеспечивающим оптимальные связи между городскими районами и выполняющим распределительную функцию при формировании локальных сетей микро-мобильности внутри отдельных районов города.

По данным операторов сотовой связи определены территории города с наибольшей концентрацией жилых массивов (Ново-Савиновский, Московский и Советский районы) и рабочих мест (Вахитовский) и интенсивным пассажиропотоком между этими районами в часы пик, вызывающим сложности в обеспечении связности внутри районов и между ними. В пределах Большого Казанского кольца (БКК) выделены участки дорог, недостаточно обеспеченные общественным транспортом, на которых организация маршрутов микромобильности могла бы стать решением проблемы «первой мили» и повысить связность внутри территории.

Возможность активного развития рассматриваемого вида трафика подтверждается данными соцопроса, проведенного авторами. По результатам опроса, 60 % горожан постоянно или сезонно используют велосипед, 64 % используют велосипед в качестве развлечения и отдыха, как средство для деловых поездок – 28 %. Частота выбора СИМ низкая: 74 % используют их очень редко, 17 % активно используют только в летний сезон. При опросе населения, не использующего средства микромобильности, были выявлены следующие сложности: 42,7 % назвали проблемой отсутствие инфраструктуры (дорожек, парковочных мест, качество покрытия); 40,6 % – отсутствие личного средства индивидуальной мобильности; 9,2 % – безопасность использования; 2,3 % – отсутствие умения использовать СИМ, 5,2 % назвали другие причины.

Обобщение результатов комплексного анализа функционально-планировочной и транспортной инфраструктуры города позволило разработать предложение по планировочной организации магистральной маршрутной сети для средств микромобильности (рис. 1).

Схема предлагаемой сети маршрутов показывает магистральные направления, основной функцией которых является соединение центра города с окраинами и пригородной зоной, и основные направления, выполняющие распределительную функцию на уровне городских районов и обеспечивающие связи между отдельными районами города.

Предлагаемое решение основано на учете особенностей сложившейся функционально-планировочной структуры города и представляет собой радиально-кольцевую сеть магистральных и основных маршрутов, состоящую из центрального ядра, трех кольцевых магистралей и шести вылетных направлений, соединяющих центральную часть города с периферийными зонами. Центральное ядро представляет собой территорию многофункционального исторического центра города, ограниченную Кремлевской набережной, улицами Пушкина, Татарстан, А. Халикова и являющуюся главной зоной притяжения. Наряду с центральным ядром выделяются также подцентры, расположенные на пересечении маршрутов высокого уровня, где, как и в ядре, присутствуют крупные объекты притяжения: торговый центр Тандем в Московском районе, Мега в Советском районе, Парк-Хаус в Ново-Савиновском и пр. Первое кольцо проходит по ул. Большая Крыловка, пр. Ямашева, пр. Победы, ул. Тихорецкой, Портовой, А. Халикова, С. Галеева. Второе кольцо – ул. Большая Крыловка, пр. Ямашева, вдоль ж/д путей, ул. Девятаева, А. Халикова, С. Галеева. Третье кольцо – ул. Большая Крыловка, пр. Ямашева, ул. Вишнев-

ского, Девятаева, А. Халикова и С. Галеева. Магистральные направления проходят вдоль ул. Боевой, Горьковского шоссе, Сибирского, Мамадышского и Оренбургского трактов.

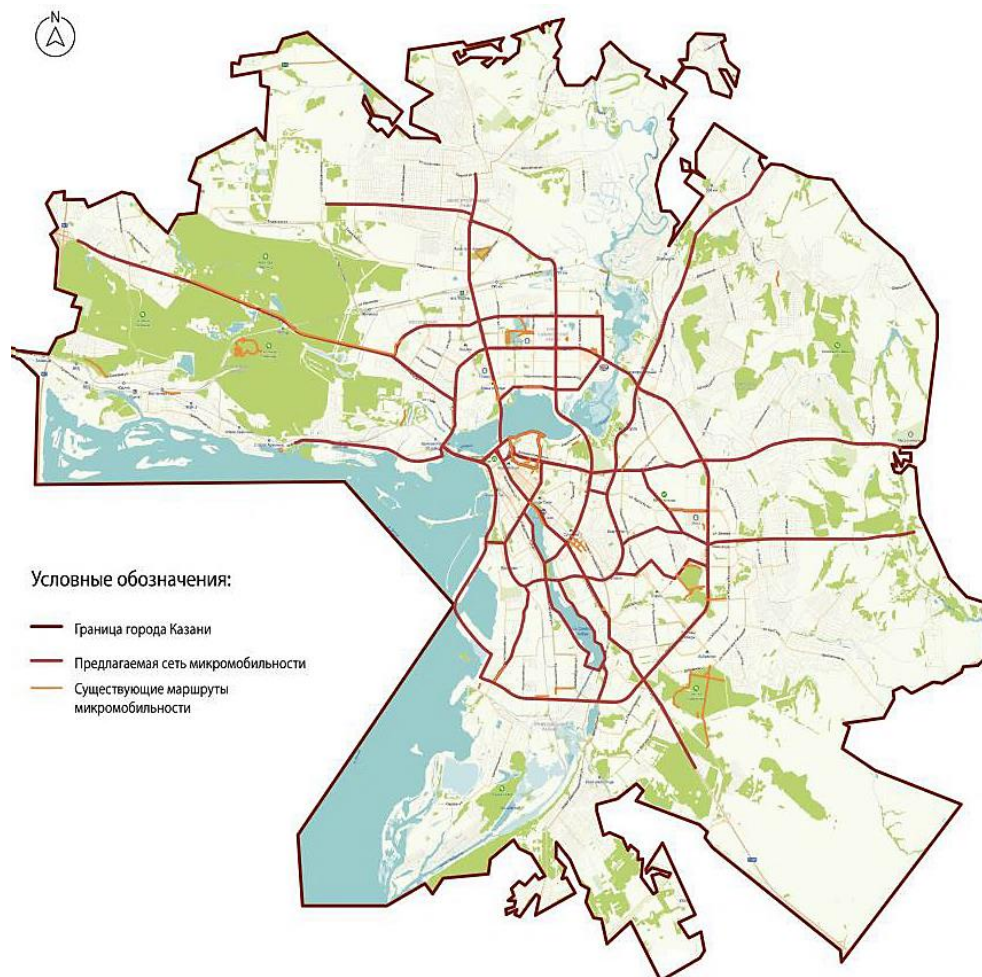


Рис. 1. Схема предлагаемой сети микромобильности Казани
Fig. 1. Micromobility network in the city of Kazan

Представленная в виде геометрической модели система магистральных и основных маршрутов (рис. 2) является основой для построения локальной или местной сети маршрутов микромобильности. Для нее характерно:

- учет классификации маршрутов по типу использования (рекреационные, туристические, деловые);
- учет разнообразия средств микромобильности;
- дифференциация маршрутов по типу конструктивного исполнения;
- обеспечение инфраструктурой обслуживания;
- создание вылетных связей между БКК и периферийной зоной.

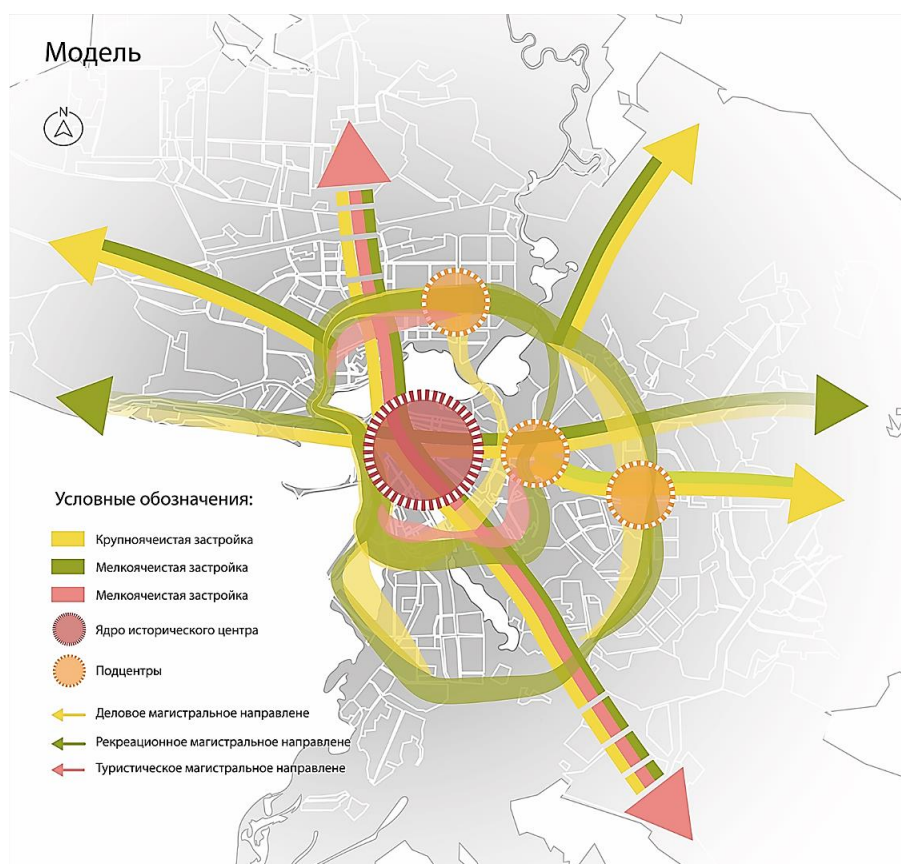


Рис. 2. Модель сети микромобильности
Fig. 2. Schematic of micromobility network

Иерархический принцип построения маршрутной сети микромобильности предполагает создание локальных или местных направлений, дифференцирующихся по плотности и функциональному назначению в зависимости от размещения в том или ином районе города, отличающихся особенностями морфологии. В работе рассмотрены три характерных района города с различными особенностями застройки, архитектурно-планировочные качества которых влияют на плотность и распределение маршрутов микромобильности:

- ядро исторического центра города;
- фрагмент срединной зоны со «смешанным» характером застройки;
- фрагмент жилого района с крупномасштабным типом застройки.

Для каждого из фрагментов городской территории была предложена система маршрутов микромобильности, а также разработаны проектные предложения по характерным фрагментам улиц, показывающие различные приемы устройства выделенных полос для средств микромобильности³ (рис. 3).

³ Подробно проектные решения представлены в магистерской диссертации: Горшкова Е.Д. Формирование планировочной инфраструктуры микромобильности в градостроительной системе г. Казани. 2022. Научный руководитель С.Х. Исмагилова.

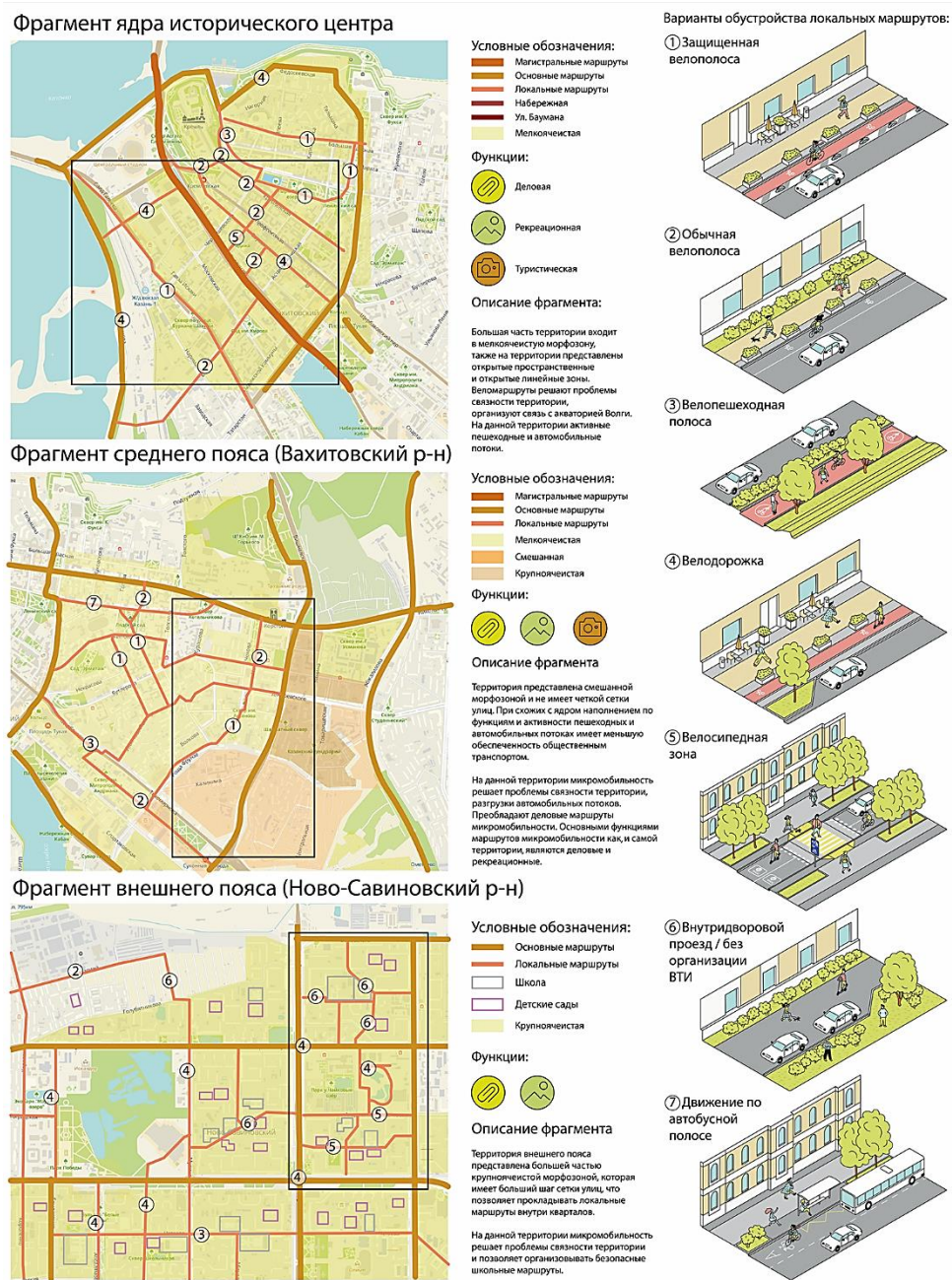


Рис. 3. Приемы устройства выделенных полос для средств микроподвижности на характерных фрагментах улиц

Fig. 3. Arrangement of lanes for micromobility devices on street fragments

На основе обобщения результатов проектных решений выявлены следующие приемы инфраструктурного обеспечения сети микроподвижности Казани:

1. Устройство мостовых связей для микромобильности за счет создания пешеходных мостов и расширения существующих с помощью консольных конструкций для выделения дополнительной полосы движения.

2. Включение в структуру пешеходных коммуникаций выделенных полос для средств микромобильности.

3. Создание выделенных полос для средств микромобильности за счет трансформации транспортных коммуникаций путем уменьшения количества автомобильных полос либо за счет уменьшения их ширины.

4. Создание системы оборудованных парковок для средств микромобильности и точек проката для регулирования хранения транспорта вблизи общественных пространств, сооружений, станций метро и транспортно-пересадочных узлов.

5. Использование различных средств дизайна для идентификации зон перемещения СИМ и велосипедов. Это – цвет и тип покрытия, водоотведение, велосипедная навигация, освещение, станции прокачки шин, датчики интенсивности велосипедного и пешеходного движения.

6. Технические средства организации дорожного движения – разделение потоков микромобильности от автомобилей и пешеходов, решения перекрестков и мероприятия по успокоению трафика.

Выводы

В работе выявлена система планировочной организации инфраструктуры микромобильности в Казани, сформирована геометрическая модель сети микромобильности общегородского уровня, показывающая распределение магистральных и основных маршрутов, связывающих городской центр с пригородными территориями, а также выполняющих распределительную функцию на уровне городских районов.

На основе учета сложившейся специфики функционально-планировочной и транспортной организации города представлены предложения по схемам развития сети движения средств микромобильности на локальном уровне на примерах трех характерных районов города, отличающихся архитектурно-планировочными характеристиками застройки. Кроме того, путем обобщения результатов проектных предложений определены приемы инфраструктурного обеспечения.

Применение полученных результатов исследования в современной градостроительной практике, в том числе при разработке документов территориального планирования, могло бы способствовать повышению эффективности функционирования транспортных систем города, а следовательно, улучшению качества жизни в городе и более устойчивому развитию Казани.

Основные выводы по работе состоят в следующем:

1. Анализ территориально-планировочных, функциональных и технологических условий Казани показал, что город располагает возможностями для полноценного развития инфраструктуры микромобильности. Сложившаяся транспортно-пешеходная инфраструктура города является основой для формирования сети микромобильности путем внедрения соответствующей системы функционально-планировочных приемов в структуру городского пространства.

2. На основе проведения комплексного анализа в исследовании предложена система маршрутов микромобильности Казани, построенная по иерархическому принципу с учетом особенностей функционально-планировочной структуры города. Предлагаемая модель магистральных и основных маршрутов, имеющая радиально-кольцевую структуру, является каркасом для построения сети маршрутов локального значения. Ее создание осуществляется в зависимости от морфологических особенностей того или иного района города и отличается следующими особенностями градостроительного формирования инфраструктуры микромобильности: классификация маршрутов по типу использования; учет разнообразия средств микромобильности; обеспечение инфраструктуры обслуживания; создание вылетных магистралей, связывающих БКК и пригород.

3. Предлагается система архитектурно-планировочных приемов по формированию инфраструктуры микромобильности на локальных территориях Казани на основе обобщения результатов проектных предложений, разработанных для трех характерных районов города с различной морфологией застройки и фрагментов выбранных территорий на примерах улиц, выделенных для микромобильности. Среди них: создание мостовых связей; обеспечение выделенных полос как в пределах пешеходных коммуникаций, так и за счет трансформации транспортных полос; создание продуманной системы локализации парковок и проката средств микромобильности; использование разнообразных средств дизайна для идентификации зон перемещения СИМ и велосипедов, а также внедрение совершенных средств технического обеспечения движения средств микромобильности.

Градостроительное формирование инфраструктуры микромобильности Казани должно быть построено на основе интеграции её в сложившуюся градостроительную систему путем создания сети, отвечающей как основным принципам организации системы микромобильности, так и учитывающей сложившуюся специфику комплекса городских условий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дюфур Дирк. Велотранспортная инфраструктура. Принципы и практика проектирования / пер. А. Панков [и др.]. Москва : ИНФРА-М, 2016. 269 с. ISBN 978-5-16-011762-1.
2. *Designing for all Ages & Abilities*. Contextual Guidance for High-Comfort Bicycle Facilities: The National Association of City Transportation Officials – NACTO, 2017. URL: <https://nacto.org/wpcontent/uploads/2017/12/NACTO> (дата обращения: 04.03.2022).
3. Dufour D. Presto Cycling Policy Guide. Cycling infrastructure. Brussels : European Cyclists' Federation, 2010. 49 p.
4. Трофименко Ю.В., Шелмаков С.В., Зеге С.О., Шашина Е.В. Велосипедный транспорт в городах / под науч. ред. Ю.В. Трофименко. Москва : МАДИ, 2020. 154 с.
5. Закирова Ю.А., Куликова Н.А. Принципы размещения и формирования общественных центров в структуре административных районов г. Казани // Известия КГАСУ. 2020. № 3 (53). С. 96–107.
6. Kadeeva A.S. Development of infrastructure for individual mobility in Novosibirsk // Noema. 2020. № 1 (4). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-infrastruktury-sredstv-individualnoy-mobilnosti-v-novosibirske> (дата обращения: 07.02.2021).
7. Krümme K., Gernant E., Stolt R., Stolze B., Moschner H. Deconstructing the Micromobility Phenomenon. A Strategic Analysis of Crucial Success Factors. Porsche Consulting : Bietigheim-Bissingen, Germany, 2019 [Google Scholar].

8. Osorio Guzmán A.M., Sivestre F.C., Yamamura J.S., Heinzen M.K., Frazon N.A. Urban spaces sustainability. Applied study to Curitiba's Central District – Brazil. World Sustainability Series. Springer International Publishing, 2019. Pp. 465–478. DOI: 10.1007/978-3-030-30306-8_28
9. Исмаилова С.Х., Залетова Е.А., Арсентьева Ю.П. Приемы архитектурно-градостроительной реконструкции жилых районов 70–90-х гг. XX века в планировочной системе г. Казани // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 153–160.
10. Gatti M.P. Maintenance, reconstruction and prevention for the regeneration of historic towns and centers // International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment. 2018. V. 9. № 1. P. 96–111. URL: <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-10-2016-0043>
11. Скрыбин И. Ильсур Метшин представил концепцию развития велодорожек в Казани // Бизнес Online : деловая электронная газета. URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/477106> (дата обращения: 24.12.21).
12. Альметьевск: 50 км велодорожек построено / пер. А. Ромашкевич // Let's bike it! URL: <http://letsbikeit.ru/2016/10/almetyevsk/> (дата обращения: 23.03.22).
13. Nello-Deakin S., Harms L. Assessing the relationship between neighborhood characteristics and cycling: Findings from Amsterdam // Transportation Research Procedia. 2019. V. 41. P. 17–36. DOI:10.1016/j.trpro.2019.09.005
14. Safe Micromobility. Corporate Partnership Board Report // International Transport Forum – OECD, 2020. URL: <https://www.itf-oecd.org/safe-micromobility> (дата обращения: 07.03.2021).
15. Rivett B., Lee T., Rainwater B. Micromobility in Cities: The current landscape. National League of Cities, 2020. 233 p.

REFERENCES

1. Cycling infrastructure. Principles and practice of design. Moscow: INFRA-M, 2016. 272 p. (In Russian)
2. Designing for fall ages & abilities. Contextual guidance for high-comfort bicycle facilities: The National Association of City Transportation Officials – NACTO, 2017. Available: <https://nacto.org/wpcontent/uploads/2017/12> (accessed March 4, 2022).
3. Dufour D. Presto cycling policy guide. General framework. Brussels: European Cyclists' Federation, 2010. 49 p.
4. Trofimenko Yu.V., et al. Cycling transport in cities. Moscow: MADI, 2020. 154 p. (In Russian)
5. Zakirova Y.A., Kulikova N.A. Principles of building of public centers in the structure of administrative districts in Kazan. *Izvestiya KGASU*. 2020; 3 (53): 96–107. (In Russian)
6. Kadeeva A.S. Development of infrastructure for individual mobility in Novosibirsk. *Noema*. 2020; 1 (4). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-infrastruktury-sredstv-individualnoy-mobilnosti-v-novosibirske> (accessed February 07.2021). (In Russian)
7. Gernant E., Stolt R., Stolze B., Moschner H. Deconstructing the micromobility phenomenon. A strategic analysis of crucial success factors. Porsche Consulting, 2019.
8. Guzmán A.O., Sivestre F.C., Yamamura J.S., Heinzen M.K., Frazon N.A. Urban spaces sustainability. Applied study to Curitiba's Central District–Brazil. World Sustainability Series, 2020. Pp. 465–478. DOI: 10.1007/978-3-030-30306-8_28
9. Ismagilova S.Kh., Zaletova E.A., Arsenteva Y.P. Methods of architectural and urban reconstruction of residential areas of the 1970–90s in Kazan planning system. *Izvestiya KGASU*. 2020; 4 (54): 153–160. (In Russian)
10. Gatti M.P. Maintenance, reconstruction and prevention for the regeneration of historic towns and centers. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. 2018; 9 (1): 96–111. DOI: 10.1108/IJDRBE-10-2016-0043
11. Skriabin I. Metshin represents the concept of cycling infrastructure development in Kazan. Available: [www.business-gazeta.ru/article/477106](http://business-gazeta.ru/article/477106). (accessed December 24, 2021). (In Russian)
12. Almet'yevsk: 50 km of bicycle roots are created. Available: <http://letsbikeit.ru/2016/10/almetyevsk/> (accessed March 23, 2022).
13. Nello-Deakin S., Harms L. Assessing the relationship between neighborhood characteristics and cycling: Findings from Amsterdam. *Transportation Research Procedia*. 2019; 41: 17–36.
14. Safe Micromobility. Corporate Partnership Board Report International Transport Forum – OECD, 2022. Available: www.itf-oecd.org/safe-micromobility (accessed March 7, 2021).

15. Rivett B., Lee T., Rainwater B. Micromobility in cities: The current landscape. National League of Cities, 2020. 233 p.

Сведения об авторах

Исмаилова Светлана Харисовна, канд. архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, 1, s2368600@yandex.ru

Горшкова Елизавета Дмитриевна, специалист отдела подготовки проектов, Фонд пространственных данных Республики Татарстан, 420034, г. Казань, ул. Декабристов, 81А, elizaveta.kzn@gmail.com

Залетова Елена Александровна, ст. преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, 1, salen07@mail.ru

Author Details

Svetlana H. Ismagilova, PhD, A/Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1, Zelenaya Str., 420043 Kazan, Tatarstan, Russia, s2368600@yandex.ru

Elizaveta D. Gorshkova, Project Preparation Specialist, Spatial Data Fund of the Republic of Tatarstan, 81A, Dekabristov, 420034, Kazan, Russia, elizaveta.kzn@gmail.com

Elena A. Zaletova, Senior Lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1, Zelenaya Str., 420043 Kazan, Tatarstan, Russia, salen07@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 20.03.2023
Одобрена после рецензирования 20.06.2023
Принята к публикации 09.07.2023

Submitted for publication 20.03.2023
Approved after review 20.06.2023
Accepted for publication 09.07.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 71–83.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 71–83.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.025.4:504

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-71-83

EDN: TNJHBL

ИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ РЕСТАВРАЦИИ. ЗАЩИТА ИСТОРИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ ОТ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

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

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена возрастающими проблемами сохранения историко-культурного наследия России, и в частности города Томска. В статье рассматриваются последствия воздействия транспортных вибраций и блуждающих токов на памятники архитектуры.

Цель статьи: обратить внимание на постоянно действующие в современных условиях источники нарушения конструктивной целостности памятников – транспортные вибрации и блуждающие токи.

Основой настоящей работы стали результаты натурных исследований объекта – памятника архитектуры регионального значения церкви Александра Невского в г. Томске, анализ ситуационного плана города в районе улиц Герцена и Советской, проведенные авторами. Составлена схема защиты памятника от распространения негативных влияний городской среды.

Новизна исследования заключается в выработке конкретных предложений по обеспечению безопасности церкви Александра Невского в г. Томске от вибраций и блуждающих токов, генерируемых трамвайными путями, проходящими в непосредственной близости от объекта.

В результате исследования представлены рекомендации по устранению негативного влияния транспортных вибраций на конструкции памятников архитектуры на примере церкви Александра Невского в г. Томске.

Ключевые слова: памятник истории и архитектуры, сохранение, целостность конструкций, транспортные вибрации, блуждающие токи, негативное воздействие

Для цитирования: Кутуков А.А., Колокольцева Е.Н., Романова Л.С. Инженерные вопросы реставрации. Защита исторических зданий от негативного воздействия окружающей среды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 71–83. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-71-83. EDN: TNJHBL

ORIGINAL ARTICLE

**ENGINEERING PROBLEMS OF RESTORATION.
PROTECTION OF HISTORIC BUILDINGS FROM NEGATIVE
ENVIRONMENTAL IMPACT**

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

Abstract: The relevance of the study is due to the problem of preservation of historical and cultural heritage of Russia and the city of Tomsk in particular.

Purpose: The aim of the paper is to draw attention to the disturbance of the structural integrity of architectural monuments such as transport vibrations and stray earth currents.

Methodology/approach: Field studies of the architectural monument of the Church of St. Alexander Nevsky in Tomsk; the analysis of the city plan in the area of Gertsen and Sovetskaya Streets; measures proposed for the monument protection from negative influences of the urban environment.

Originality: The paper proposes protection measures for the Church of St. Alexander Nevsky of the regional importance from vibrations and stray earth currents generated by trams moving in the vicinity of the Church.

Practical implications: Recommendations are given for eliminating the negative impact of transport vibrations on architectural monuments on the example of the Church of St. Alexander Nevsky in Tomsk.

Keywords: historical and architectural monument, conservation, structural integrity, transport vibrations, stray earth currents, negative impacts

For citation: Kutukov A.A., Kolokol'tseva E.N., Romanova L.S. Engineering problems of restoration. Protection of historic buildings from negative environmental impact. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 71–83. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-71-83. EDN: TNJHBL

Введение

Актуальность исследования обусловлена возрастающей необходимостью сохранения историко-культурного наследия России, и в частности г. Томска. Наиболее проблематичной является инженерная реставрация. Любое здание или сооружение постоянно подвергается различным воздействиям извне, которые необходимо учитывать. Особенно это касается исторических зданий, окружающая застройка которых производилась во времена, когда некоторых аспектов влияния городской среды ещё не существовало. Если такие параметры среды, как атмосферные осадки, грунтовые воды, ветровые нагрузки и прочее, учитывались при строительстве исторических зданий, то предугадать вероятность появления в городской среде постоянных вибрационных нагрузок или воздействия электрических зарядов было тогда просто невозможно. Стоит учитывать, что для осознания влияния такого воздействия потребовалось ещё много лет. Даже в современном мире упомянутые факторы не всегда принимаются во внимание. Акцент смещён на влияние различных производственных вибраций на организм человека [1, 2, 3] и сейсмических вибраций на конструкции зданий [4, 5]. При этом практически отсутствуют исследования, в которых рассматривается динамика системы «транспортное средство – грунт – охраняемое сооружение», особенно в контексте влияния на памятники архитектуры [6].

Цель статьи: обратить внимание на постоянно действующие в современных условиях источники нарушения конструктивной целостности памятников – транспортные вибрации и блуждающие токи.

Новизна исследования заключается в разработке предложений по обеспечению безопасности церкви Александра Невского в г. Томске, памятника архитектуры регионального значения, от вибраций и блуждающих токов, генерируемых трамвайными путями, проходящими в непосредственной близости от церкви.

С учетом общего физического старения существующих зданий вопросы обеспечения надежности сооружений, связанные с транспортной вибрацией и блуждающими токами, являются сегодня крайне актуальными. Особенно в тех случаях, когда данные воздействия нарушают сложившийся гидрологический режим почвы. Так, транспортная вибрация оказала существенное негативное воздействие на состояние многих памятников истории и культуры, поставив под вопрос само существование литературного некрополя, гостиницы «Бристоль», кинотеатра «Таутомаграф», усадьбы Тулинова – Вигеля в Воронеже; зданий ансамбля деревянного зодчества (11 жилых домов конца XIX – начала XX в.) в Петрозаводске; усадебного дома и музея И.Д. Бурлыкина в г. Иваново; исторического Каменного моста в центре Калуги; усадьбы «Пехра-Яковлевское» и церкви Рождества Богородицы в селе Никольское-Трубецкое Балашихинского района Московской области и пр. [6, 7].

Исследователи отмечают следующее: «Непоправимый ущерб наносит транспортная вибрация многим историко-архитектурным музеям и заповедникам: Староладожского историко-архитектурного и археологического музея-заповедника, литературно-мемориального музея-усадьбы П.Е. Щербова и Государственного художественно-архитектурного музея-заповедника «Ораниенбаум» в Ленинградской области и Санкт-Петербурге; Елабужского государственного историко-архитектурного и художественного музея-заповедника в Татарстане; Краснодарского государственного историко-археологического музея-заповедника им. Е.Д. Филиппина, Новороссийского государственного исторического музея-заповедника в Краснодарском крае; Государственного историко-культурного музея-заповедника «Московский Кремль», музея-усадьбы Л.Н. Толстого «Хамовники», музея-усадьбы «Останкино», Государственного историко-художественного музея-заповедника «Абрамцево», музея-заповедника «Дмитровский кремль» в Москве и Московской области; Тобольского государственного историко-архитектурного музея-заповедника в Тобольской области и пр.» [6, с. 7–9; 7].

Наличие в среде памятника неподконтрольных блуждающих токов выражается в коррозионной агрессивности среды по отношению к металлическим элементам, в том числе к армированию фундаментов, водо- и газонесущим коммуникациям, в насыщении почвенных вод продуктами электролиза с их последующей адсорбцией телом кирпича.

История развития Томского городского транспорта

Первый автомобиль, конструктивно напоминавший самоходную повозку, появился в Томске в 1902 г. Единичный экземпляр этого, не сильно от-

личавшегося по весу от лошадиных упряжей, транспортного средства не оказывал заметных вибраций на здания.

В 1907 г. в Томск прибыл Луиджи Барзини на «Итале» – будущей победительнице ралли Пекин – Париж. Спортивный автомобиль имел колёса, напоминавшие колёса телеги, более привычный руль, отсек для двигателя в передней части и место под двух пилотов. Бóльший вес автомобиля мог оказать более сильные вибрационные воздействия, но их повторяемость не могла быть обеспечена ввиду всё ещё большой редкости представителей нового класса автомобилей.

К 1910 г. в Томске насчитывалось уже 12 частных автомобилей, среди которых были «Даррак» Е.И. Владовского, «Кассери-Торпеда» И.И. Смирнова и «Жермэн» А. Горохова (рис. 1). После октября 1917 г. автомобильные заводы (например, завод Автомобильного Московского общества – АМО) увольняли бывших управляющих инженеров, из-за чего развитие автопромышленности в стране замедлилось на долгие годы. Лишь через пять лет, в 1924 г., с конвейера сошёл первый АМО-Ф15 (копия Fiat 1915 г.). На базе этого автомобиля в стране было начато производство автобусов, пожарных машин, коммерческого транспорта.



Рис. 1. Один из первых авто в Томске в сопровождении велосипедистов. Фото из Центра документации новейшей истории Томской области

Fig. 1. One of the first motor-cars and cyclists in Tomsk. Photograph from the Documentation Centre of Contemporary History of the Tomsk Region

Популяризация легкового транспорта началась в 1927 г. с производства НАМИ-1, чья конструкция была скопирована уже с Tatra-11. В 1928 г. Е. Чудаков отчитался о производстве 20600 автомобилей – ничтожно малом количестве по сравнению с другими странами и в масштабе имевшихся территорий. Действительно «народным» автомобиль станет лишь в послевоенные годы¹.

¹ Автомобильная жизнь России после Великого Октября. URL: <https://www.zr.ru/content/amp/articles/909137-do-osnovaniya-a-zatem/> (дата обращения: 27.06.2023).

История трамваев Томска начинается примерно то же время. В 1948 г. 7 ноября состоялся первый пробный проезд трамвая по маршруту Городской сад – электроламповый завод – пересечение пр. Кирова с улицами Красноармейской и Тверской². Негативное влияние транспортных магистралей на техническое состояние конструкций окружающей застройки резко усилилось в период увеличения числа транспортных средств в конце 1960 – начале 70-х гг. [6].

Транспортные вибрации и блуждающие токи в городской среде

Борьба с шумом и вибрациями имеет в своей основе много общего: в обоих случаях необходимо погасить волны, распространяющиеся в среде, особенно в твёрдом теле. Поскольку большинство транспортных средств, перемещаясь по неоднородному дорожному покрытию, генерируют шум и вибрации различной степени интенсивности, а трамваи имеют также большую неподдрессоренную массу, то им всем свойственно создание сильного фронта колебательного воздействия на окружающую застройку. Здания, в свою очередь, попадая в вибрационное поле, реагируют в режиме, параметры которого напрямую зависят от внешнего воздействия, чем определяется вероятность и степень повреждений объекта. Это сказывается на техническом состоянии зданий. В результате динамических напряжений появляются трещины и расслоение материалов кладки с образованием внутренних пустот, происходит выкрашивание растворов [6].

Вибрации также ухудшают санитарно-гигиенические условия пребывания людей в зданиях. Различные колебания воспринимаются всем телом человека, но наиболее подверженными им частями являются вестибулярный аппарат, глаза и суставы. Через костную ткань вибрации могут передаваться непосредственно на внутренние органы, вызывая нарушения в функционировании желудка, нервной и эндокринной систем, аритмию сердца. Вибрации, вызванные автомобилями, в среднем относятся к низкочастотным (8–16 Гц)³. Критерии неблагоприятного воздействия вибрационных волн, а также предельно допустимые уровни колебаний ограждающих конструкций для жилых и общественных зданий приведены в ГОСТ 12.1.012–90 «Вибрационная безопасность» и СН 2.2.4/2.1.8.566-96.

В исследованиях вибраций крайне непостоянным остаётся теоретический расчёт колебаний ввиду неравномерности транспортного потока, ограниченных возможностей в оценке жёсткостных характеристик памятников и непредсказуемых отклонений в физических параметрах грунта на протяжении всего расстояния от источника вибраций до здания (рис. 2). По данным некоторых исследований, отклонение теоретических расчетов от фактически измеренных может достигать до 200 %. Поэтому основным способом получения достоверной информации до сих пор является проведение натурных измерений [6] (Алимов, 2006).

² Томский трамвай // Товики. URL: https://towiki.ru/view/Томский_трамвай#:~:text=В%20ноябре%201948%20года%20была,7-го%20ноября%201948%20года (дата обращения: 06.27.2023).

³ Транспортная вибрация // Испытательный лабораторный центр (ИЛЦ), г. Саранск, 2022 г. URL: <https://13.rospotrebnadzor.ru/content/transportnaya-vibraciya> (дата обращения: 15.07.2023).

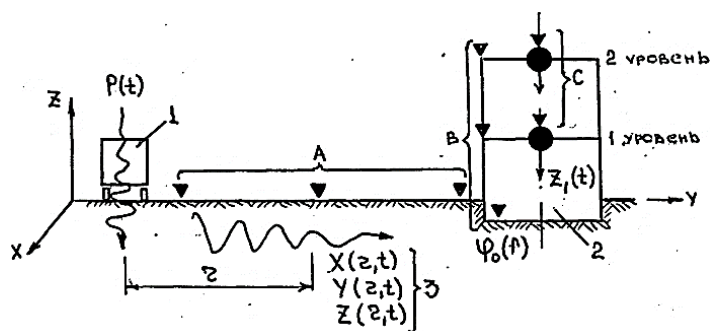


Рис. 2. Физическая модель колебаний:

1 – транспортное средство; 2 – здание; 3 – параметры вибрационного потока.
Измерительные системы: А – динамика грунта; В – колебания фундамента и стен; С – колебания перекрытий [6]

Fig. 2. Physical model of vibrations:

1 – vehicle; 2 – building; 3 – vibration flow parameters. Measurement systems: А – soil dynamics; В – foundation and wall vibrations; С – floor vibrations [6]

Недостатки транспортных магистралей приводят к возникновению вибраций, особенно на участках повышенного износа дорожного полотна: поворотах, перекрёстках, участках с движением большегрузного транспорта. Для рельсового транспорта определяющими параметрами являются качество межрельсовых стыков и степень жесткости вагонных амортизаторов. По данным литературных источников отечественных и зарубежных исследователей, усредненные радиусы негативного воздействия транспортной вибрации на основания зданий составляют от движения автотранспорта $\sim 12\text{--}15$ м, трамваев ~ 50 м, поездов $\sim 100\text{--}150$ м [6, 7].

По характеру передачи колебательной энергии на сооружение во всех случаях транспортная вибрация является кинематическим возмущением сооружения, схожим с колебательными процессами при землетрясениях, что позволяет применять знания сейсмологии к защите от низкоамплитудных транспортных вибраций. Частотные диапазоны вибрационного воздействия от автотранспорта в среднем равны: $1\text{--}10$ Гц – для амортизирующих конструкций, $10\text{--}20$ Гц – для шин (зависит от рисунка протектора и грубости дорожного покрытия) и от 50 до нескольких сотен герц – для узлов конструкций. С физической точки зрения любое здание или сооружение является и потребителем, и переносчиком колебательной энергии, зависящей от характеристик самих колебаний, среды распространения, характера контакта среды с сооружением и меры инертности самого сооружения [6]. Таким образом, чем больше вес транспорта, жёстче и грубее поверхность дорожного полотна, плотнее и неподвижнее грунт, жёстче область его контакта со зданием и жёстче связи в самом здании, тем интенсивнее влияние магистрали на конструкции.

Наилучшим передатчиком вибраций является твёрдое и относительно лёгкое тело. Таким передатчиком могут являться асфальтобетонное покрытие и тротуарная плитка на цементно-песчаном основании, устроенные вплотную к конструкции памятника, какое можно наблюдать у церкви Александра Невского в г. Томске.

Перекрёсток улиц Герцена и Советской в г.Томске является примером воздействия ещё одного фактора, оказывающего влияние на интенсивность транспортных вибраций, – массы проезжающего транспорта, а именно трамваев, две линии которых проходят по ул. Советской (рис. 3). В настоящее время существует множество технологий устройства виброподавляющих конструкций трамвайных путей, но ситуация осложняется тем, что трамвайные линии построены в середине прошлого века без учёта интенсивности современных вибрационных нагрузок. Для их реконструкции необходима полная замена шпального и рельсового полотна.

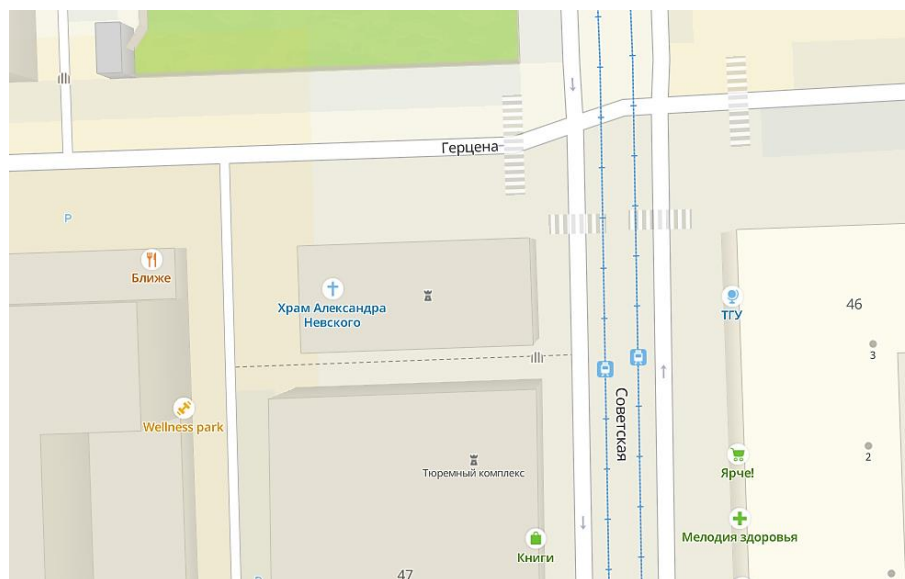


Рис. 3. Ситуационная схема церкви Александра Невского в Томске. Источник 2GIS

Fig. 3. 2GIS map of the Church of St. Alexander Nevsky in Tomsk

Кроме вибрационного трамвайные пути оказывают также и электрохимическое воздействие на конструкции окружающей застройки «блуждающими токами». В системе электропитания трамваев нулевой проводник имеет соединение с рельсами, а фазный находится над путями. Питание осуществляется за счёт тяговых подстанций. Расстояние между подстанциями неизменное, а блуждающие токи появляются из-за искривленности маршрутов. В данном случае заряженные частицы идут по траектории с наименьшим сопротивлением – не через рельсы, а по грунту.⁴ Последствиями их косвенного влияния являются коррозионные повреждения металлоконструкций, ведущие к физическому износу подземных коммуникационных сетей, утечкам газа, воды и нефтепродуктов; помехам в электрических цепях, средствах связи

⁴ Блуждающие токи: причины возникновения и способы защиты от них // Электрик – портал об электричестве. URL: <https://orensbyt.ru/elektrosnabzhenie/bluzhdayushhie-toki-prichiny-vozniknoveniya-i-sposoby-zashhity-ot-nih.html> (дата обращения: 25. 06. 2023); Что такое блуждающий ток? // ЭКС Компания Электрокомплектсервис. URL: <https://www.elektro.ru/articles/priroda-bluzhdayushchikh-tokov-i-zashchita-ot-nikh/> (дата обращения: 27.06.2023).

и т. п. [8] Электризация растворов солей и других химических веществ разностью потенциалов блуждающих токов, способных распределяться по подземным металлическим конструкциям и изделиям на значительные расстояния (в зависимости от напряжения сети, силы и частоты тока), приводит к эффекту «крысолова», когда влага под действием электрического тока направляется вдоль течения зарядов, которые, как правило, ведут к тем или иным зданиям.

Защита от транспортных вибраций и блуждающих токов

Памятник архитектуры регионального значения церковь Александра Невского находится в плотной городской застройке Томска, на пересечении двух дорожных магистралей и трамвайных путей (рис. 4), поэтому подвергается постоянному и интенсивному вибрационному воздействию, не учтенному при строительстве (рис. 5). Поскольку установка подрельсовых вибропоглощающих прокладок в ближайшее время не представляется возможной, то для снижения вибрационного воздействия рекомендуется выполнение ограждающей вибрационной защиты. Защита от вибраций существующих зданий предлагается неинвазивным способом с созданием «вибрационной тени» посредством сети противовибрационных скважин.

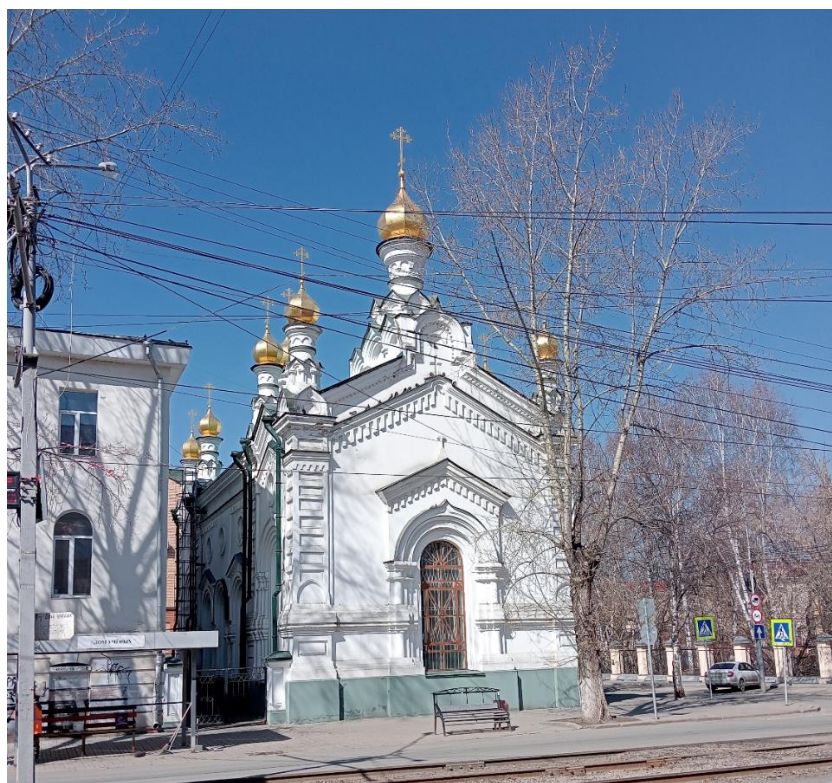


Рис. 4. Восточный фасад церкви Александра Невского. г. Томск, ул. Советская. Фото А. Кутукова, 2023 г.

Fig. 4. The eastern facade of the Church of St. Alexander Nevsky. Tomsk, Sovetskaya Steet. Photograph by Kutukov A., 2023

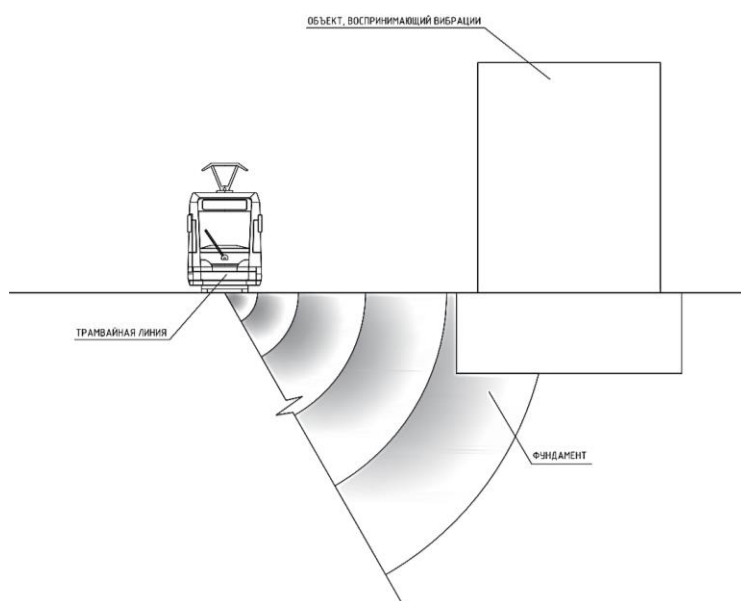


Рис. 5. Схема влияния транспортных вибраций на конструкции зданий. Выполнил А. Кутуков
Fig. 5. Schematic of transport vibrations. Drawing by Kutukov A.

Для памятника архитектуры, особенно находящегося в стеснённых городских условиях, наиболее щадящим будет выполнение вибрационной защиты скважинного типа, а также ограничение тоннажа автотранспорта на прилегающих улицах. Экран защиты представляет собой два ряда скважин, расположенных в шахматном порядке со стороны источника вибраций (рис. 6).

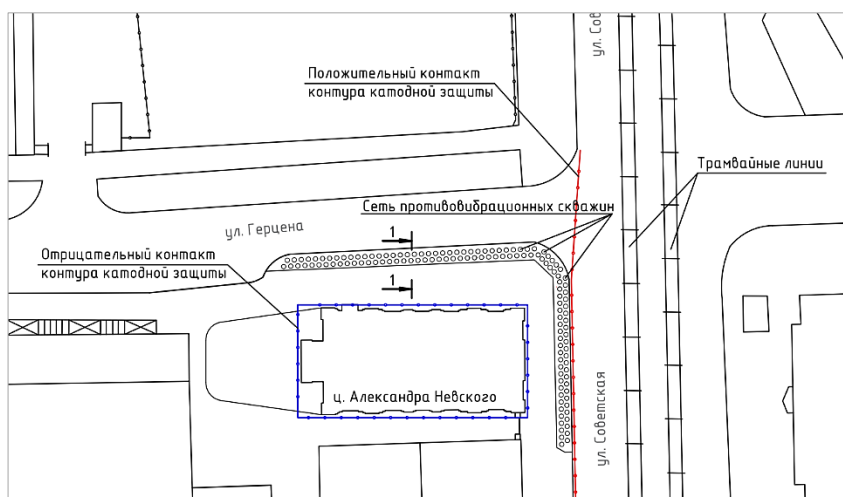


Рис. 6. Схема расположения предлагаемых антивибрационных траншей и контура катодной защиты у церкви Александра Невского в г.Томске. Предложение А. Кутукова, 2023 г.

Fig. 6. Layout of anti-vibration trenches and cathodic protection circuit for the Church of St. Alexander Nevsky in Tomsk. Proposed by Kutukov A., 2023

Согласно техническому решению, скважины заполнены защитным материалом, размещенным в двуслойной эластичной оболочке со смазочным порошковым материалом между слоями [9].

Скважины заполняются смесью легких сыпучих материалов, обеспечивая защиту конструкций от воздействия транспортных вибраций продольного и поперечного типа. Продольные волны, вызывающие сжатие и растяжение грунта за счет релаксации напряжений на контактах частиц, превращают энергию вибраций в тепло, обеспечивая ее эффективное рассеивание в окружающее пространство. Влияние поперечных волн уменьшается благодаря снижению контактного трения и сцепления вдоль боковых поверхностей защитного материала на границе со стенками скважины [9].

Технология устройства экрана из виброзащитных скважин наиболее безопасна для памятника архитектуры, т. к. не создаёт повышенных нагрузок на его конструкции при монтаже и заключается в бурении скважин по одной с укладкой эластичной подготовленной оболочки, засыпкой вибропоглощающим материалом и устройством жёсткого, но не плотного покрытия из бетонных дорожных плит 30×30 см. После этого переходят к монтажу следующей скважины (рис. 7).

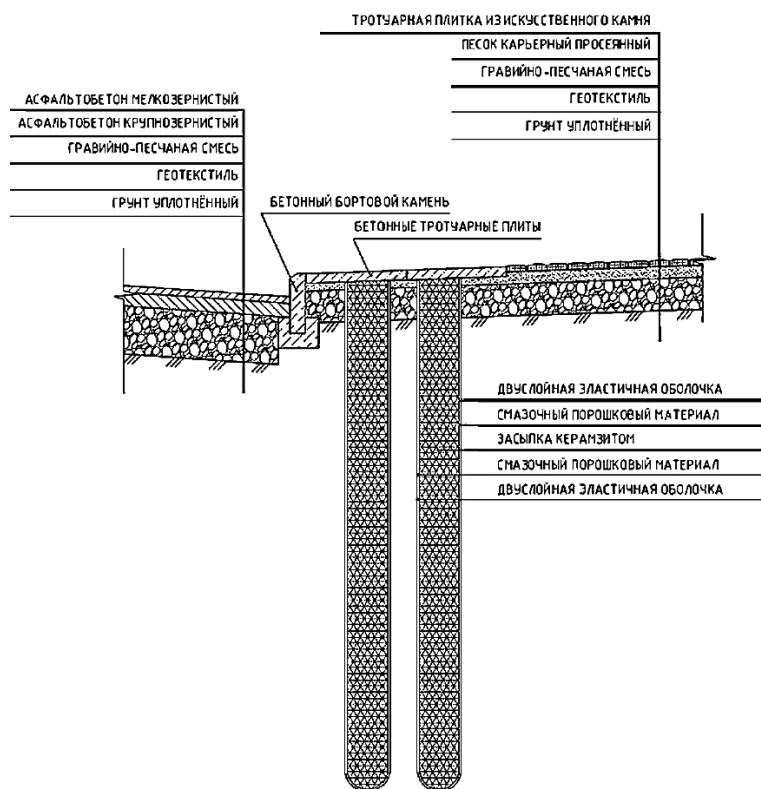


Рис. 7. Разрез 1-1. Устройство антивибрационных скважин у церкви Александра Невского в г. Томске. Предложение А. Кутукова, 2023 г.

Fig. 7. Section 1-1. Arrangement of anti-vibration wells near the Church of St. Alexander Nevskiy in Tomsk. Proposed by Kutukov A., 2023

От вибропоглощающих свойств материала зависят параметры экрана: чем эффективнее материал, тем меньше может быть размер/площадь экрана. Так, песком засыпают скважины шириной свыше 60 см, керамзитом и щебнем – 40–60 см. Использовать старый щебень со следами извести и цемента в качестве засыпки нежелательно, поскольку при насыщении влагой она может образовать комки и сильно уплотниться, что ухудшит защитные свойства экрана.

Влияние блуждающих токов от трамвайных путей на памятники архитектуры можно ликвидировать с помощью катодной защиты. Это способ предотвращения стекания тока в почву или способ создания пути наименьшего сопротивления для зарядов с направлением их в нужную сторону. Необходимо создать благоприятные условия для протекания анодных реакций, а не катодных. Для этого отрицательный полюс источника тока опоясывает защищаемую территорию и пролегающие на ней металлоконструкции, подсоединяется к металлическим водопроводным трубам, а положительный полюс крепится к специальному заземлению – аноду или группе анодов (часто такой анод называют «жертвенным», поскольку он берёт на себя большую часть разрушающего воздействия зарядов). В этом случае ток, ранее протекавший через землю, сможет вернуться к своему источнику. Необходимо также помнить, что пассивной защитой от разрушений блуждающими токами является дополнительное антикоррозийное покрытие металлических конструкций⁵.

Выводы

1. Современные реставрационные инженерные задачи должны включать защиту памятников архитектуры от негативных воздействий, не предусмотренных в период их строительства, – транспортных вибраций и блуждающих токов.

2. При устройстве защиты памятника от транспортных вибраций и блуждающих токов важно сохранять исторические материалы и конструкции, максимально применяя неинвазивные методы. Таким критериям соответствуют предложенные экран виброзащиты скважинного типа и катодная защита периметра памятника.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Давыдова Е.В., Дзюба Ю.М. Особенности факторов риска хронических неинфекционных заболеваний при длительном стаже с производственной вибрацией // Вестник научных конференций. 2021. № 10-1 (74). С. 20–22.
2. Кирсанов В.В. Нормирование и предельно допустимый уровень производственной, транспортной вибрации и вибрации для жилых и общественных зданий // Химия и инженерная экология : сб. докладов XV Всероссийской конференции. Казань : Отечество, 2015. С. 173–175.
3. Вязов А.Е. Классификация и виды производственной вибрации // Студенческий вестник : электронный научный журнал. 2021. № 1 (146). URL: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/146> (дата обращения: 09.06.2023).
4. Панов А.Б., Дамдинова Д.Р., Ломова Н.М. Инженерно-сейсмическое обследование зданий – памятников истории, архитектуры и культуры Республики Бурятия // Вестник Во-

⁵ Что такое блуждающий ток? // ЭКС Компания Электрокомплектсервис. URL: <https://www.elektro.ru/articles/priroda-bluzhdayushchikh-tokov-i-zashchita-ot-nikh/> (дата обращения: 27.06.2023).

сточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, 2016. № 3 (60). С. 18–23.

5. *Белаш Т.А., Альдреби З.А.* Оценка сейсмостойкости архитектурных памятников зодчества на территории Сирии // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1 (44). С. 21–25.
6. *Алимов С.Г.* Оценка влияния транспортной вибрации на конструкции зданий – памятников архитектуры : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук / Дальневосточный государственный технический университет им. В.В. Куйбышева. Владивосток, 2006. С. 1–28.
7. *Борисов Е.К., Алимов С.Г., Усов А.Г., Лысак Л.Г., Крылова Т.В., Степанова Е.А.* Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортных вибраций. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2007. 128 с.
8. *Глухарёв Ю.Д., Гладков М.Н.* К вопросу о блуждающих токах при эксплуатации электрифицированного рельсового транспорта : доклад // Неделя горняка-98 : симпозиум. Москва : МГТУ, 1998.
9. *Патент № 52415* Российская Федерация, МПК E02D 31/08 (2006.01). Экран для защиты зданий и сооружений от вибраций : № 2005118573/22 : заявл. 2005.06.15 : опубл. 2006.03.27 / Бобряков А.П., Лубягин А.В. 16 с.

REFERENCES

1. *Davydova E.V., Dzyuba Y.M.* Risk factors of chronic non-infectious diseases in long-term experience in industrial vibrations. *Vestnik nauchnykh konferentsii*. 2021; 10-1 (74): 20–22. (In Russian)
2. *Kirsanov V.V.* Norming and maximum permissible level of industrial, transport, residential and public building vibrations. In: *Proc. 15th All-Russ. Conf. 'Chemistry and Engineering Ecology'*, Kazan, 2015, Pp. 173–175. (In Russian)
3. *Vyazov A.E.* Classification and types of industrial vibration. *Studencheskii vestnik*. 2021; 1 (146). Available: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/146> (accessed 9 June, 2023). (In Russian)
4. *Panov A.B., Damdinova D.R., Lomova N.M.* Engineering and seismic survey of historical, architectural, and cultural monuments in the Republic of Buryatia. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya*. 2016; 3 (60): 18–23. (In Russian)
5. *Belash T.A., Aldrebi Z.A.* Earthquake resistance of architectural monuments in Syria. *Bezopasnost' sooruzhenii*. 2020; 1 (44): 21–25. (In Russian)
6. *Alimov C.G.* Transport vibration effect on architectural monuments. PhD Abstract. Vladivostok, 2006. Pp.1–28. (In Russian)
7. *Borisov E.K., Alimov S.G., Usov A.G., Lysak L.G., Krylova T.V., Stepanova E.A.* Experimental dynamics of structures. Monitoring of transport vibrations. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2007. 128 p. (In Russian)
8. *Glukharev Y.D., Gladkov M.N.* Earth stray currents in operation of electric railway transport. *Proc. Symposium 'Miner's Week'*. Moscow, 1998. (In Russian)
9. *Bobryakov A.P., Lubyagin A.V.* Screen for building protection from vibrations. Patent Russ. Fed. No. 52415, 2006. 16 p. (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.

Романова Лариса Степановна, канд. архитектуры, доцент, советник РААСН, член ТРО СА России, заведующая кафедрой РиРАН, 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.

Larisa S. Romanova, PhD, A/Professor, RAACS Adviser, 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 29.06.2023
Одобрена после рецензирования 30.06.2023
Принята к публикации 14.07.2023

Submitted for publication 29.06.2023
Approved after review 30.06.2023
Accepted for publication 14.07.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 84–97.

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 (4): 84–97.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-84-97

EDN: BMHMXC

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОСУГОВОГО СТУДЕНЧЕСКОГО ЦЕНТРА ТГАСУ В Г. ТОМСКЕ

Мария Игоревна Рубанова

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

Аннотация. Статья посвящена изучению многофункциональных общественных зданий досугового назначения для разработки на основе существующих норм и правил проектирования современного студенческого досугового центра для студентов Томского государственного архитектурно-строительного университета.

В работе рассмотрены и проанализированы яркие примеры клубных зданий, построенных в 20–30-е гг. XX в. по проектам известного советского архитектора К. Мельникова.

Целью работы является создание концепции студенческого досугового центра ТГАСУ в г. Томске.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания комфортной среды для организации отдыха студентов в соответствии с современными условиями.

В ходе исследования *применялись методы* комплексного анализа и систематизации данных из привлеченных библиографических источников, сравнительного анализа и творческого синтеза для разработки проектных решений.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при подготовке докладов для конференций, в качестве эскизного проекта для реального проектирования.

Научная новизна исследования заключается в проведенном анализе привлеченных источников и предложенном автором проектном решении.

Результатом исследования стала концепция студенческого досугового центра ТГАСУ, представляющая собой целостную спортивно-досуговую зону, отвечающую современным требованиям комфортного отдыха молодежи.

Ключевые слова: досуговый центр, клуб, многофункциональное общественное здание, досуг студентов, проектирование зданий

Для цитирования: Рубанова М.И. Концептуальные основы проектирования досугового студенческого центра ТГАСУ в г. Томске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 84–97. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-84-97. EDN: BMHMXC

ORIGINAL ARTICLE

DESIGN PRINCIPLES OF LEISURE STUDENT HUB IN TOMSK STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND BUILDING

Maria I. Rubanova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. *Purpose:* Studying multifunctional public buildings for leisure to develop a student hub in Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB).

Methodology/approach: Comprehensive analysis and data systematization of the literature; creative synthesis to develop design solutions. The bright examples of clubs built in the 1920–30s by K. Melnikov, the famous Soviet architect, are analyzed to propose design principles for the leisure student hub in TSUAB.

Research findings: Design principles of the student leisure center in TSUAB are proposed to meet the modern requirements for comfortable leisure for young people.

Practical implications: Research results can be used in the preparation of conference reports, draft projects on actual design.

Value: The literature review and proposed design principles.

Keywords: leisure center, clubhouse, multifunctional public building, student hub, design principles

For citation: Rubanova M.I. Design principles of leisure student hub in Tomsk State University of Architecture and Building. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 84–97. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-84-97. EDN: BMHMXC

Исторический город Томск – один из немногих в России, в котором главным градообразующим ядром является образовательный комплекс из шести государственных университетов. В связи с этим организация комфортной среды для отдыха студентов здесь является важной градостроительной задачей.

Целью исследования стало изучение концептуальных основ проектирования лучших образцов общественных культурно-просветительских зданий (клубов) для разработки досугового центра для студентов Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Научная новизна статьи заключается в проведенном анализе многофункциональных общественных зданий досугового назначения – клубов, построенных по проектам советского архитектора К. Мельникова, и разработанном на основе существующих норм и правил проектирования проектом решения современного студенческого досугового центра для студентов ТГАСУ.

Строительство заведений для отдыха и проведения досуга людей известно ещё со времен античности. Прототипами построек такого типа можно считать греческие гетерии и римские коллегии. В Англии с XVIII в. за подробными объектами закрепляется название «клуб».

Клуб (от англ. clob или club через нем. club) – место встречи людей с едиными интересами (деловыми, познавательными, развивающими, развлекательными и пр.), часто официально объединённых в сообщество, организацию или ассоциацию [1]. Во второй половине XIX в. в России стали открывать так называемые народные дома. Это культурно-просветительские учре-

ждения клубного типа, объединяющие следующие функции: театрально-лекционный зал, библиотеку с читальней, торговую лавку, иногда в них входили воскресные школы [2].

В советское время наиболее крупные постройки досугового назначения получали название домов или дворцов культуры и предназначались чаще всего для организации досуга трудящихся [3].

В 20-е гг. XX столетия в СССР велось планомерное возведение рабочих клубов, чему немало способствовало активное профсоюзное движение. Универсальность функций сохранялась в основном в сельских клубах, в городах же возникли предпосылки для формирования специализированных типов клубных зданий, рассчитанных на творческую деятельность, – дома народного творчества, клубы художественной самодеятельности. Создавались клубы по интересам, например, встречались клубы коллекционеров различного профиля, туристов, автолюбителей; создавались женские и мужские клубы, клубы пенсионеров, молодежи, людей одной профессии, спортивные клубы и пр. [4].

Широкую известность получили здания клубов, построенных по проектам советского архитектора Константина Мельникова. В 20–30-х гг. XX столетия он разработал проекты шести рабочих клубов в Москве и области, в которых воплотил определенные им базовые признаки качественной архитектуры. Концептуальной основой этих признаков являются:

1. Соответствие проекта «наибольшим удобствам технологического и функционального порядка».

2. Соответствие «прямым экономическим достижениям композиционного приема, которые могут быть выявлены с точностью арифметических подсчетов».

3. «Выразительная художественная форма сооружения» [5].

Все шесть клубов, построенных по проектам К. Мельникова, отличаются по форме, размеру и функциональности, однако их объединяют две основные черты – гибкая система залов, предполагающая возможность объединения и разделения помещений мобильными перегородками, и активное использование наружных лестниц для экономии внутреннего пространства учреждения культуры.

Архитектурно-композиционные решения клубов К. Мельникова выдержаны в формах конструктивизма. Они отличаются лаконичностью, яркими запоминающимися образами и рациональными планировочными решениями, поэтому являются видными акцентами в городской среде. Как правило, это многофункциональные объекты со сложными объемно-планировочными решениями [6]. В этой связи целесообразно рассмотрение построек К. Мельникова в качестве примеров для разработки концепции досугового центра ТГАСУ в г. Томске.

Клуб имени И.В. Русакова (1927–1929) на ул. Стромынка, 6, станция метро «Сокольники» (рис. 1).

Это первый клуб, построенный по проекту К. Мельникова в Москве по заказу Союза транспортников МХК (заказчика знаменитого Бахметьевского гаража и гаража для грузовых машин на Новорязанской улице).

Клуб рабочих имени И.В. Русакова в Москве является ярким образцом конструктивистской архитектуры. Здание клуба построено в форме веера с тремя консольными бетонными объемами залов, возвышающимися над ос-

нованием. Каждый из этих объемов можно использовать как отдельный зал, а вместе они дают вместимость более 1000 чел. Основными строительными материалами являются бетон, кирпич и стекло. Функция здания в какой-то степени выражена в экстерьере, который Мельников характеризовал как «напряженный мускул».



Рис. 1. Здание клуба имени И.В. Русакова на ул. Стромынка, 6, в Москве (1927–1929). Современный вид (слева) (URL: <https://maximumtest.ru/uchebnik/10-klass/istoriya/vtoroy-etap-kulturnoy-revolutsii-v-sssr-1930e-gg>); схема плана и разрез (справа) (URL: <https://ru.pinterest.com/pin/583779170441975575/>)

Fig. 1. Rusakov's club on Stromynka Street, Moscow (1927–1929). Modern view (left) and layout (right)

С 2012 по 2015 г. проводились реставрационные работы здания, в ходе которых объекту был частично возвращен первоначальный облик и введено дополнительное оборудование для доступа маломобильных групп населения.

Клуб фабрики «Буревестник» (1927–1929) на ул. 3-я Рыбинская, 17, станция метро «Сокольники» (рис. 2).



Рис. 2. Здание клуба фабрики «Буревестник» на ул. 3-я Рыбинская, 17, в Москве (1927–1929). Современный вид здания. Фото Е. Чеснокова (слева) (URL: <https://evgechesnokov.livejournal.com/179458.html?view=comments>); схема планировочного решения (справа) (URL: <http://theconstructivistproject.com/ru/object/35/klub-obuvnoi-fabriki-burevestnik>)

Fig. 2. The club of the Burevestnik factory on Rybinskaya Street, Moscow (1927–1929), modern view. Photograph by E. Chesnokov (left) and layout (right)

Клуб «Буревестник» был построен К. Мельниковым совместно с архитектором А.М. Калмыковым по заказу кооператива одноименной обувной фабрики. Первоначальная концепция заключалась в большом зрительном зале с бассейном под ним, который можно было накрывать во время выступления. Однако бассейн не мог быть реализован из-за недостаточного водоснабжения. Архитектурным акцентом здания является пятилепестковая остекленная башня с люком. Данная постройка развивает мельниковскую концепцию единой выразительной формы объема клуба с трансформирующимся интерьерным пространством.

В настоящее время облик здания подвергся изменениям. После ремонта в 1990 г. были заложены некоторые оконные проемы, упрощена расстекловка оконных витрин башни и почти полностью изменены интерьеры. В бывшем клубе располагается Фонд содействия сохранению русского наследия «Русский авангард».

Клуб Дорхимзавода им. М.С. Фрунзе (1927–1929) на ул. Бережковская набережная, 28, станции метро «Киевская» и «Студенческая» (рис. 3).



Рис. 3. Здание клуба Дорхимзавода имени М.С. Фрунзе на ул. Бережковская набережная, 28, в Москве. Современный вид (слева) [4]; планировочные решения (справа) (URL: <https://otzyv.ru/review/221675/>)

Fig. 3. The building of the Frunze Dorkhimzavod club on Berezhkovskaya Street, Moscow. Modern view (left) [4] and planning solutions (right)

Клуб для рабочих Дорогомиловского химического завода им. Фрунзе расположен напротив Новодевичьего монастыря, на противоположном берегу реки. Здание представляет собой строгий, компактный объем. Традиционно центральный возвышающийся объем предназначен для зрительного зала. На крыше выступающего объема первого этажа расположена терраса. Большая площадь витринного остекления придает монументальным кубическим объемам лёгкость. Первоначальный замысел архитектора сделать сдвижные стены для объединения зрительного зала с фойе не был осуществлен. Позже к зданию была пристроена столовая, которая нарушила целостность постройки. В 2009 г. здание клуба было отреставрировано и включено в реестр как подлежащее государственной охране в качестве объекта культурного наследия регионального значения. В настоящее время по назначению объект не используется, в нем размещается торговый центр.

Клуб фабрики «Свобода» (1927–1929) на ул. Вятской, 41а, станция метро «Савеловская» (рис. 4).

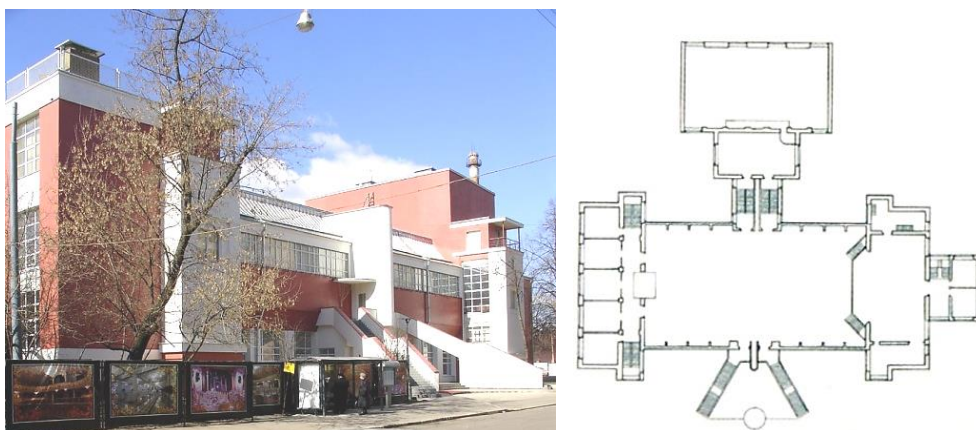


Рис. 4. Современный вид клуба фабрики «Свобода» на ул. Вятской, 41а, в Москве (слева) (URL: https://dic.academic.ru/pictures/wiki/files/77/Melnikov_Svoboda_Club_Moscow.jpg; схема планировочного решения (справа) (URL: <https://toptigki.livejournal.com/46348.html>)

Fig. 4. Modern view of the "Freedom" Factory club on Vyatskaya Street, Moscow (left) and layout (right)

Клуб рабочих парфюмерной фабрики «Свобода» построен по заказу профсоюза химиков и известен также как Дворец культуры имени Максима Горького.

Первоначальная концепция клуба «Свобода» представляла собой плоскую эллиптическую трубу-цистерну, расположенную между прямоугольными объемами. Главный зрительный зал, размещенный внутри трубы, предполагалось использовать как целиком, так и разделять на два независимых зала (по 500 мест каждый). Каждый конец трубы заканчивался кубическим объемом, в котором находились сценические механизмы и небольшие залы. Идеально симметричная структура была визуальнo центрирована двумя криволинейными противопожарными лестницами. Однако идея не была реализована, так же как и бассейн, который планировалось разместить на цокольном этаже. Труба была заменена прямоугольным каменным объемом; лестница построена прямой, а не изогнутой. Единственным криволинейным элементом является центральная колонна трибуны, уравнивающая левую и правую половины конструкции. Они не идентичны: северный торцевой блок значительно выше противоположного; центральная трибуна скрывает это несоответствие. Однако внутри главный зал довольно близок к первоначальному замыслу: потолок, образованный наклонной кровлей, действительно напоминает плоскую трубу-цистерну (рис. 4).

На момент 2007 г. (март) клуб «Свобода» находился в довольно хорошем внешнем состоянии. Здание было окрашено в соответствии с оригинальной цветовой гаммой – бело-красным. Единственное отличие от фотографий 1920-х гг. – отсутствие цветового акцента вокруг окон торцевого блока (первоначально был третий цвет – более бледный оттенок красного). Улица также претерпела изменения – она была значительно расширена, были высажены

деревья, разбиты газоны, появились пешеходные дорожки [7]. Планировочное решение здания значительно изменено, в нем сейчас располагаются ресторан и караоке-бар.

Клуб завода «Каучук» (1927–1929) на ул. Плющихе, 64, станции метро «Фрунзенская» и «Парк культуры» (рис. 5).



Рис. 5. Современный вид здания клуба завода «Каучук» на ул. Плющихе, 64, в Москве (слева) (URL: <https://fishki.net/3256170-konstruktivizm-v-hamovnikah-chasty-3-klub-zavoda-kauchuk-i-drugaja-infrastruktura.html>); чертежи (справа) (URL: <https://www.bu-denpos.ru/2016/06/19601990.html>)

Fig. 5. Modern view of the "Kauchuk" Plant club on Plyushchikha Street, Moscow (left) and drawings (right)

Клуб рабочих завода «Каучук» построен по заказу Союза химиков, как и клубы фабрики «Свобода» и Дорхимзавода им. Фрунзе. Клуб «Каучук» расположен в районе Хамовники Москвы на окраине парка «Девичье поле» и медицинского городка, на пересечении предполагаемого тогда бульварного кольца и ул. Плющихи.

Клуб имеет форму четверти цилиндра, в нем размещен театральный зал на 800 мест с двумя балконными уровнями. Сегодня его форму и размеры скрывают тополя и примыкающая к фасаду терраса китайского ресторана. Наружные лестницы, опоясывающие кассовый павильон цилиндрической формы, как и в предыдущем объекте, являются пожарными и практически не используются, как и задуманная К. Мельниковым трансформация сцены путем поднятия её на уровень балконов для освобождения места на нижнем ярусе для устройства массовых мероприятий.

В настоящее время в здании работают ночной клуб и ресторан, оно находится в удовлетворительном внешнем состоянии; огромная неоновая надпись, размещавшаяся в 2003 г., была удалена. Однако интерьеры клуба утрачены в результате постоянных реконструкций, оригинальные окна также заменены на современные рамы [6, 7].

Клуб фарфорового завода им. газеты «Правда» в Ликино-Дулево на ул. Ленина, 1 (рис. 6).

Одно из клубных зданий К. Мельникова, построенное за пределами Москвы, – это клуб фарфорового завода в Ликино-Дулево. Клуб расположен

в парке культуры и отдыха «Дулевский», недалеко от производственных корпусов завода. Рядом стоит церковь Иоанна Богослова.



Рис. 6. Современный вид здания клуба фарфорового завода им. газеты «Правда» в Ликино-Дулево на ул. Ленина, 1 (слева) (URL: <https://redeveloper.ru/redeveloperskie-proekty/concept/dvoretz-kultury-dulyevskogo-farforovogo-zavoda-likino-dulevo-moskovskaya-oblast-rossiya/>); планировочные решения (справа) (URL: <http://theconstructivistproject.com/ru/object/890/dom-kultury-farforovogo-zavoda>)

Fig. 6. Modern view of the Newspaper "Pravda" Porcelain Factory club in Likino-Dulyovo on Lenin Street (left) and layout (right)

Как и в здании клуба им. И.В. Русакова, в основе плана лежит треугольник, в вершине которого размещается сцена, остальная площадь занята зрительным залом. Основание треугольника раздваивается, образуя двухэтажные корпуса, к ним под прямым углом примыкают одноэтажные. В двухэтажных частях расположены: небольшой балетный класс, библиотека (левый корпус), санузлы и помещения для клубной работы (правый корпус). В одноэтажных частях здания размещаются фойе (левый корпус) и спортивный зал (правый корпус). Зрительный зал рассчитан на 630 мест. Горизонтальная композиция здания вполне соответствует малоэтажной застройке центральной улице в Дулево.

В этом клубе традиционная трансформация планировалась в минимальном виде – в проекте предполагалось, что задняя часть сцены будет раздвигаться в летнее время, чтобы зрители могли смотреть представления из парковой зоны. Расположенная в центре соединённых корпусов круглая аудитория, вход на которую осуществляется по двум лестницам из холла клуба, при необходимости соединяется со зрительным залом, увеличивая общую вместимость до 1000 чел. При строительстве были внесены незначительные изменения в проект, однако система трансформации залов была осуществлена. В благодарность «за хорошую и удачную архитектуру» рабочие завода преподнесли К.С. Мельникову в подарок фарфоровое блюдо с его портретом.

Условия сохранения клуба им. газеты «Правда», по сравнению с другими мельниковскими постройками, оказались удачнее. Присутствие в небольшом городке столь знаменитого сооружения мотивирует жителей гордиться им. Клуб окружен заботливым вниманием, к нему относятся как к памятнику

архитектуры не формально: не допускают перестроек и стараются поддерживать его в надлежащем состоянии. Сейчас здание дома культуры находится на балансе Дулёвского фарфорового завода. В нем размещается библиотека с читальным залом, спортивный зал, хореографический класс, классы для художественной самодеятельности, занятий по интересам, кроме того, здесь проходят спектакли молодёжного театра «Глобус».

Таким образом, можно отметить, что рассмотренные выше здания рабочих клубов представляют собой многофункциональные объекты, выполненные в актуальном на тот период стиле и воплотившие в своем объеме инновационные конструкторские идеи. Они являются яркими акцентами в городской среде, имея сложные объемно-планировочные решения и яркие запоминающиеся образы. Данные характеристики необходимо использовать при проектировании современных досуговых центров.

В современном мире формируется новый тип досугового центра – деловой клуб, который объединяет как досуговую, так и деловую функции. Помимо традиционных зрелищной и клубной частей в таких объектах присутствует развитая группа офисных помещений – комнаты для переговоров, конференц-залы и свободные универсальные пространства.

Если рабочие клубы в настоящее время не так популярны, как сто лет назад, то студенческие досуговые центры являются важными составляющими общественной студенческой жизни и в настоящее время. Они становятся местом соединения как социально-творческой, профессионально-развивающей, научно-исследовательской функций, так и информационно-коммуникативной. В связи с этим при проектировании студенческого досугового центра важно создать условия для социальной адаптации студентов, мотивации профессионального роста и реализации индивидуальных способностей. Поэтому центр досуга студентов должен располагаться в непосредственной близости от жилых корпусов вуза.

При проектировании студенческого досугового центра необходимо также помнить, что организация свободного времени обучающихся неразрывно связана с функционированием учебного заведения. Ещё с давних времен в состав университетов входили как учебные корпуса, так и здания общественного назначения – библиотека, собор, рынок, музей и пр. Поэтому проектируемое здание для студенческого досуга должно быть многофункциональным, совмещающим в себе различные виды деятельности. Традиционно объемно-планировочное решение досугового центра совмещает в себе основную зрительную (зрелищную) часть и клубные (кружковые) помещения, которые должны быть отделены друг от друга, но при этом иметь удобную связь между собой [8].

Проектируемый студенческий досуговый центр ТГАСУ предлагается разместить вблизи транспортной развязки на пересечении крупных транспортных магистралей г. Томска: ул. Пушкина, пр. Комсомольский, ул. Иркутский тракт. Таким образом транспортная доступность проектируемого досугового центра будет обеспечиваться как общественным, так и автомобильным транспортом (рис. 7). Также в радиусе 250 м от места размещения объекта находятся студенческие общежития и спортивный комплекс ТГАСУ. Площадь участка, отведенная под размещение центра, составляет 3,40 га.



Рис. 7. Ситуационная схема размещения досугового центра ТГАСУ. Курсовой проект автора¹
 Fig. 7. Schematic of TSUAB leisure hub. Term project by Rubanova M.I.

Предлагаемая концепция студенческого досугового центра ТГАСУ была навеяна картинами из фильма «Дюна» режиссера Дени Вильнёва, снятого по научно-фантастическому роману американского писателя Фрэнка Герберта, опубликованному в 1963–1965 гг.

Проектируемый студенческий досуговый центр имеет неправильную в плане форму, благодаря которой он органично вписывается в существующее окружающее пространство. Также рядом с местом проектирования располагается спортивный комплекс ТГАСУ, поэтому в проекте предусмотрено комплексное благоустройство этой территории. С северной и западной сторон от проектируемого объекта предлагается устроить парковую зону с сетью пешеходных дорожек, оборудованную системой освещения и скамейками для отдыха. В соответствии с нормами размещения общественных зданий, вокруг проектируемого объекта предусмотрен круговой проезд. По пер. Иркутскому запроектированы парковочные места на необходимое количество машино-мест. Создание парковой зоны позволит комфортно использовать пеший маршрут до общежитий ТГАСУ (рис. 8).

С учетом проведенных исследований и нормативных требований предлагаются следующие проектные решения: проектируемый студенческий досуговый центр представляет собой 1–2-этажный объем, выполненный на основе железобетонного каркаса. Архитектурно-композиционное решение главного (восточного) фасада здания представляет собой стилизацию под лесной массив, где

¹ Рубанова М.И. Проект студенческого досугового центра ТГАСУ в г. Томске: курсовой проект / рук. М.В. Артамонов // Материалы архива кафедры «Архитектурное проектирование» ТГАСУ. Томск: ТГАСУ, 2022.

наклонные колонны с кронштейнами имитируют стволы деревьев, а расстекловка панорамных окон – их ветви (рис. 9). Со стороны западного фасада, за возвышающимся объемом конференц-зала, над блоком административных и вспомогательных помещений расположена открытая терраса, ориентированная на парковую зону, размещенную за досуговым центром (рис. 10, план 2-го этажа).

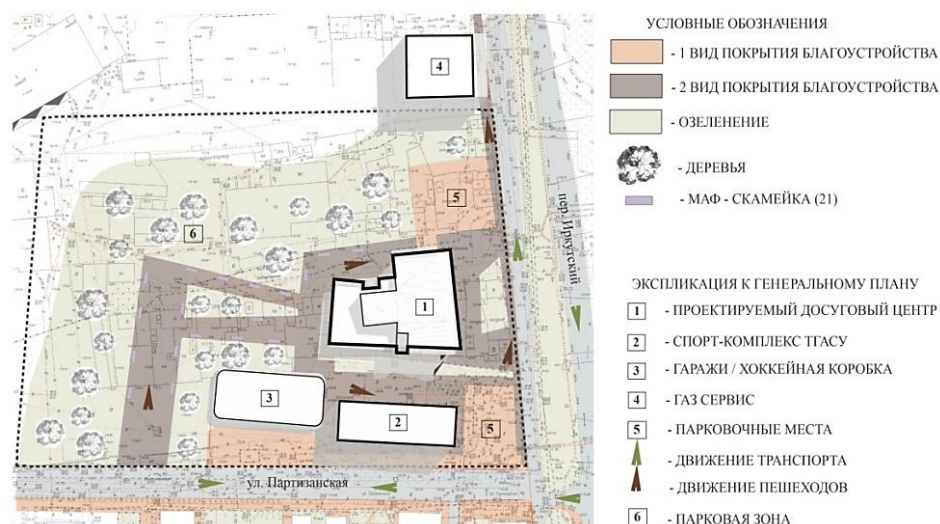


Рис. 8. Генеральный план студенческого досугового центра ТГАСУ²
Fig. 8. General plan of the student leisure center in TSUAB



Рис. 9. Общий вид проектируемого студенческого досугового центра ТГАСУ³
Fig. 9. General view of the student leisure center in TSUAB

² Рубанова М.И. Проект студенческого досугового центра ТГАСУ в г. Томске: курсовой проект / рук. М.В. Артамонов // Материалы архива кафедры «Архитектурное проектирование» ТГАСУ. Томск: ТГАСУ, 2022.

³ Там же.

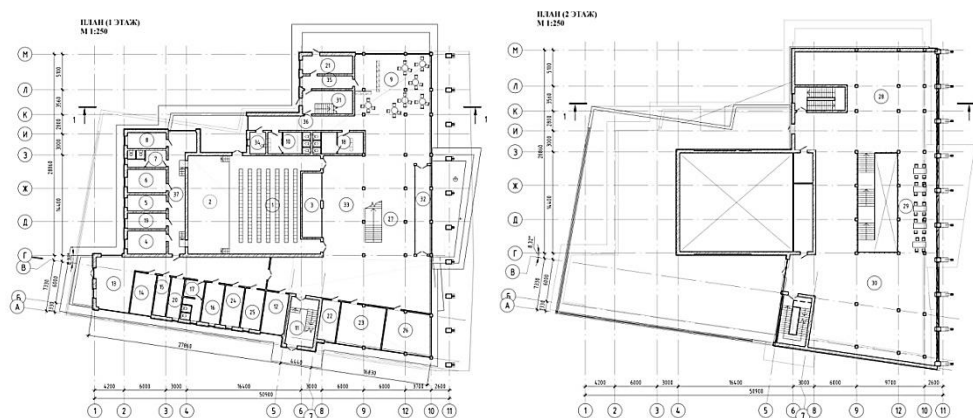


Рис. 10. Планы этажей студенческого досугового центра ТГАСУ. Выполнено автором
Fig. 10. Floor plans of TSUAB student leisure center. Made by the author

Доминирующим композиционно-планировочным элементом постройки является конференц-зал на 200 чел., вокруг которого формируются административные, хозяйственные, технические и подсобные помещения. Главный вход в центр размещен с уличного фасада, ориентированного на пр. Комсомольский. Входная группа помещений выходит в просторный холл с лестницей на второй этаж и помещениями кафе. На втором ярусе размещена библиотека с читальным залом и выставочное пространство (рис. 10).

Рациональным планировочным решением стало объединение компьютерного и читального залов в общую зону (рис. 11). Здесь размещена библиотека с книгохранилищем, читальный зал с двухместными столами на 18 чел. и зона отдыха с креслами-диванами (рис. 12). С противоположной стороны имеется просторное выставочное пространство с возможностью организации свободного подхода к экспозициям. Верхний этаж оснащен выходами на террасу, которую можно активно эксплуатировать в летний период для проведения мероприятий, праздников, занятий йогой или фитнесом.



Рис. 11. Интерьер читального зала студенческого досугового центра ТГАСУ. Выполнено автором
Fig. 11. Reading room of the student leisure center in TSUAB. Made by the author

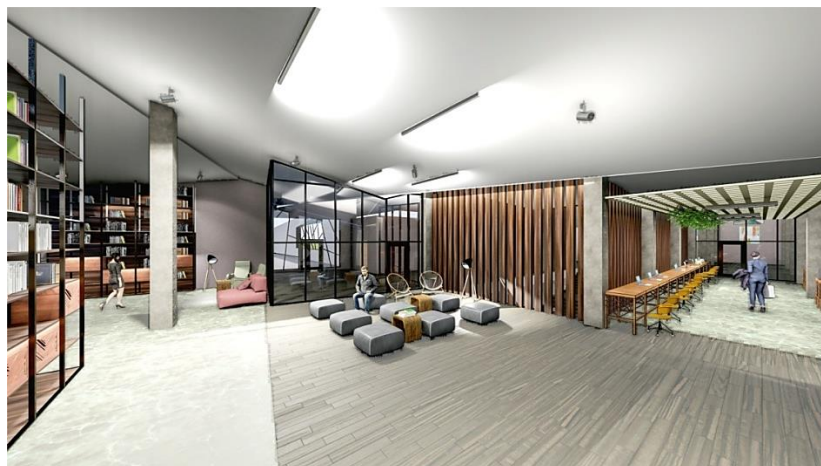


Рис. 12. Интерьер библиотеки зоны отдыха и читального зала студенческого досугового центра ТГАСУ. Выполнено автором

Fig. 12. Library and reading room in TSUAB leisure center. Made by the author

В единой стилистике здания предлагается выполнить и интерьеры. В отделке помещений применены природные цвета и экологичные отделочные материалы: дерево, керамогранит «под камень», стекло (рис. 11, 12). Помещения наполнены светом благодаря витринному остеклению. Освещение в темное время суток организовано за счет оборудования различными приборами: подвесными лампами, спотами, светодиодной подсветкой.

Таким образом, предлагаемая концепция студенческого досугового центра ТГАСУ отвечает признакам качественной архитектуры, разработанной в традициях лучших образцов клубных построек начала XX в.

Здание представляет собой многофункциональный объем, объединяющий различные виды деятельности – отдых студентов, занятия по интересам, выполнение учебных заданий и пр., в связи с чем может осуществлять важные коммуникативные функции – социальной адаптации студентов, мотивации профессионального роста и реализации индивидуальных способностей.

Кроме этого, предлагаемый досуговый центр обладает оригинальным обликом и гармонично вписывается в окружающую среду, являясь архитектурным акцентом района, удобным в использовании как автомобилистам, так и пешеходам. Предложенное комплексное благоустройство объекта с окружающей территорией представляет собой целостную спортивно-досуговую зону, отвечает современным требованиям комфортного отдыха как для студентов, так и жителей района.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Клуб // Академик* : [сайт]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/646491> (дата обращения: 15.01.2023).
2. *Народные дома* / сост. М.И. Андреев, В.М. Карев ; глав. ред. С.О. Шмидт // Москва: Энциклопедия. Москва : Большая российская энциклопедия, 1997. 976 с.

3. *Дворцы и дома культуры в СССР* / гл. ред. А. М. Прохоров // Большая советская энциклопедия. В 30 томах. 3-е изд. Москва : Советская энциклопедия, 1969–1978.
4. *Красильникова Л.Г.* Инженерное благоустройство в архитектурном проектировании. Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2015. 103 с. ISBN 978-5-7389-1849-0.
5. *Хан-Магомедов С.О.* Константин Мельников. Москва : Архитектура-С, 2006. С. 168.
6. *Бойе А.* 5 московских клубов Константина Мельникова // Архитектурная кухня. URL: <https://www.1artchannel.com/single-post/2016/11/14/5clubovmelnikova> (дата обращения: 15.01.2023).
7. *Svoboda Club.* Moscow, Russia // Architectuul : [сайт]. URL: <https://architectuul.com/architecture/svoboda-club>
8. *Рекун Т.А.* Проект-концепция студенческого досугового центра в городе Томск // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 1. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18035> (дата обращения: 15.01.2023).

REFERENCES

1. Club. Available: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/646491> (accessed January 15, 2023). (In Russian)
2. *Andreev M.I., Karev V.M.* People's houses. S.O. Schmidt, Ed. Great Russian Encyclopedia. 1997. 976 p. (In Russian)
3. *Prokhorov A.M. (Ed.)* Palaces and houses of culture in the USSR. Great Soviet Encyclopedia, in 30 vol., 3rd ed. Moscow, 1969–1978. (In Russian)
4. *Krasilnikova L.G.* Engineering improvement in architectural design. Khabarovsk, 2015. 103 p. ISBN 978-5-7389-1849. (In Russian)
5. *Khan-Magomedov S.O.* Konstantin Melnikov. Moscow: Arkhitektura-S, 2006. Pp. 168. (In Russian)
6. *Boye A.* 5 Moscow clubs of Konstantin Melnikov. Available: www.1artchannel.com/single-post/2016/11/14/5clubovmelnikova (accessed January 15, 2023). (In Russian)
7. Freedom Club. Moscow, Russia. Available: <https://architectuul.com/architecture/svoboda-club> (In Russian)
8. *Rekun T.A.* The project-concept of a student leisure center in the city of Tomsk. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik*. 2018; (1). Available: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18035> (accessed January 15, 2023). (In Russian)

Сведения об авторе

Рубанова Мария Игоревна, студентка, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mariaruban@vtomske.ru

Author Details

Maria I. Rubanova, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mariaruban@vtomske.ru

Статья поступила в редакцию 06.07.2023
Одобрена после рецензирования 13.07.2023
Принята к публикации 17.07.2023

Submitted for publication 06.07.2023
Approved after review 13.07.2023
Accepted for publication 17.07.2023

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 98–115.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 98–115.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.072.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-98-115

EDN: RFDPNF

НАПРЯЖЕНИЯ И СДВИГ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ СО СБОРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И СТАЛЬНЫМИ БАЛКАМИ

Денис Владимирович Конин

*Центральный научно-исследовательский институт
строительных конструкций имени В.А. Кучеренко
АО «НИИЦ Строительство», г. Москва, Россия*

Аннотация. Актуальность. Сталежелезобетонные перекрытия со сборными железобетонными плитами являются индустриальной быстровозводимой конструкцией. Применение таких конструкций позволяет сокращать сроки строительства, экономить металл, получать эффективные конструкции без выступающих балок на пролетах до 20 м под нагрузки гражданских зданий, сооружений и автостоянок. В известных источниках, сводах правил и зарубежных нормах сборные железобетонные плиты перекрытий не включаются в работу комбинированной конструкции, т. к. проектировщики стараются избегать сложных узлов соединений (сварка, болты) при строительстве. Несомненный интерес представляет включение в работу комбинированной сталежелезобетонной балки сборных плит, а также бетона омоноличенных швов между сталью и плитами при отсутствии дополнительных анкеров и связей.

Цель. Для выявления работы на сдвиг рассмотрены результаты экспериментальных исследований моделей конструкций, а также крупномасштабных перекрытий размером 6×10 м со сборными плитами.

Основные результаты. Выявлены закономерности работы контактных зон «сталь – бетон» и «сталь – бетон – анкер», построены диаграммы работы контактных зон для численных расчетов. Испытания перекрытий показали, что при использовании простейших способов объединения монолитный железобетон, объединяющий сталь и сборные элементы, задействует в работу сборные плиты на расстоянии от оси балки не менее 2 толщин перекрытий для двух различных способов опирания.

Выводы. Численное моделирование с учетом работы контактной зоны показало хорошую сходимость с экспериментальными результатами. Рекомендуется уточнить зна-

чения ширины сжатой полки бетона в нормативных документах для расчета конструкций со сборным железобетоном.

Ключевые слова: бетон, сталь, сталежелезобетонная конструкция, стержневая арматура, сборный элемент, сжатая полка, контакт, сдвиг

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. Напряжения и сдвиг сталежелезобетонных перекрытий со сборными элементами и стальными балками // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 98–115. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-98-115. EDN: RFDPNF

ORIGINAL ARTICLE

STRESS AND SHEAR OF STEEL REINFORCED FLOORS WITH PREFABRICATED UNITS AND STEEL BEAMS

Denis V. Konin

*Kucherenko Central Research Institute for Structural Construction,
Moscow, Russia*

Abstract. Steel-reinforced concrete floors with prefabricated reinforced concrete slabs are industrial quickly erectable structures. The use of such structures makes it possible to reduce construction time, save metal, obtain efficient structures without beam projecting up to 20 m for loads produced by buildings and car parks. Codes and foreign norms do not include prefabricated reinforced concrete floor slabs in the operation of combined structures, as designers try to avoid complex connections (welding, bolts) during construction. Of obvious interest is the inclusion of precast slabs in the operation of combined steel and reinforced concrete beam as well as grouted joints between steel and slabs in the absence of additional anchors and connections.

Experimental results of structural models and 6×10 m floors with precast slabs are considered to identify the concrete shear. The effective shear deformation up to 0.5 mm is detected even without additional anchors. Simplest anchors significantly increase the joint operation of cast concrete and steel profile. The operation mechanism is determined for steel-concrete and steel-concrete-anchor contact zones, and respective diagrams are plotted for numerical calculations.

Floor testing shows that the use of the simplest joining, cast reinforced concrete combining steel and precast elements involves precast slabs at a distance from the beam axis of at least two thicknesses of the floor for two different ways of the beam support.

Numerical modelling, including the contact zone operation, shows good agreement with the experimental data. It is recommended to clarify the width of compressed concrete flange in normative documents for the structural analysis.

Keywords: concrete, steel reinforced floor, reinforcement, prefabricated unit, compression flange, contact, shear

Funding: Research was financially supported by the Steel Construction Development Association, Moscow, Russia.

Acknowledgements: The author is grateful to I.I. Vedyakov, DSc, S.S. Kapriellov, DSc, I.A. Chilin, DSc, and A.V. Buchkin PhD for their help in experiments. Thanks also go to A.S. Krylov, PhD, and I.V. Rtischeva, PhD for their help in the obtained data processing.

For citation: Konin D.V. Stress and shear of steel reinforced floors with prefabricated units and steel beams. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 98–115. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-98-115. EDN: RFDPNF

Введение

Комбинированные сталежелезобетонные перекрытия со сборными железобетонными плитами являются индустриальной быстровозводимой конструкцией [1, 2, 3]. Для корректного расчета конструкций, в том числе с использованием численных и аналитических моделей, требуется выявление их действительной работы, связей между взаимодействующими элементами. Особенно сложным является взаимодействие между разнородными материалами (сталь и бетон), имеющими различные модули деформаций [4].

Совместная работа частей комбинированных сталежелезобетонных конструкций обеспечивается конструктивными мероприятиями либо расчетными методами [4, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 20]. То есть расчетным путем определяют предельные нагрузки на конструкции, когда деформации бетона, стали, арматуры имеют близкие значения. Для корректного расчета комбинированной сталежелезобетонной конструкции, когда в ее работе задействованы элементы сборного железобетона, требуется учет следующих факторов: сцепление монолитного бетона со сталью в швах объединения стальной балки и сборных плит перекрытий; характер работы монолитного бетона, когда стальной профиль балки обетонирован частично или между полками; ширина включения в работу сжатой зоны бетона сборных элементов перекрытий, объединенных со стальной балкой только монолитным бетоном швов [1, 7, 8, 9, 11, 14, 18].

В ряде работ установлено, что расчет сталежелезобетонного перекрытия со сборными элементами имеет особенность в части определения высоты сжатой зоны, ширины сжатой полки бетона [7, 9, 10, 12]. В рамках ранее выполненных и указанных выше экспериментально-теоретических исследований авторы стремились различными путями сделать связь между стальной балкой и сборными плитами максимально жесткой. Например, предлагалось замоноличивать предварительно раскрытые пустоты бетона, пропускать через стенку балки сложные анкерные выпуски и т. д. Эти мероприятия требуют дополнительной подготовки плит, увеличивают вес перекрытия, создают дополнительные «мокрые» процессы. Поэтому необходимо стремиться к максимальному упрощению связи сборных плит со стальной балкой без потери эффективности ее работы.

Очевидно, что правильный учет этих факторов невозможен без проведения экспериментальных исследований и подтверждения современных теоретических предпосылок расчета, сведенных в нормы на проектирование конструкций в СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования».

Методы

Для выявления работы на сдвиг контактной зоны «сталь – бетон» проведены испытания частично обетонированных стальных профилей без обработки поверхности (рис. 1). Длина поверхности сцепления бетона со сталью вдоль приложенного усилия на сдвиг равна 550 мм, размер бетонной призмы между полками двутавра – 185×176 мм. Стальной двутавр 20Ш1 по ГОСТ Р 57837–2017 выполнен из стали С255; призма сделана из бетона марки В30. На стенке стального двутавра моделей М1.2, М1.3 предусмотрена установка 8 гибких упоров (по 4 с каждой стороны стенки) из арматурной стали диаметром 10 мм и длиной 50 мм. Модель М1.3 армирована стержневой и поперечной арматурой диаметром 10 мм. Вся арматура класса А500С. Для обеспечения достоверности испытано 3 идентичных модели каждого вида. Всего испытано 9 моделей группы М1.

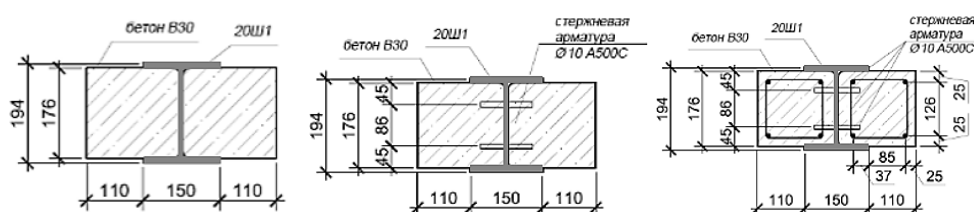


Рис. 1. Модели группы М1 (поперечное сечение)

Fig. 1. Models of group M1 (cross section)

Для установления действительной работы частично обетонированных стальных балок с элементами перекрытий из сборного железобетона проведены испытания полноразмерных моделей М3 перекрытий двух видов (рис. 2).

Все модели перекрытий имели шесть шарнирно неподвижных опор, три стальные балки пролетом 6 м и настил из сборных преднапряженных многопустотных плит длиной 5 м и толщиной 160 мм, уложенных на стальные балки. Совместная работа стальных балок и плит достигалась за счет сил трения, посредством установки дополнительных конструкций объединения (прижимных уголков) и заполнением полости между стенкой стальной балки и торцами перекрытий, частичным омоноличиванием пустот в плитах на глубину 100–150 мм от торца плиты. Поперечное сечение балок для модели М3.1 – несимметричный сварной двутавр высотой 214 мм (рис. 2, б), для М3.2 – прокатные профили 30Б1 по ГОСТ Р 57837–2017. Материал двутавров – сталь С255 и С345. Для заполнения швов между плитами и омоноличивания участков пустот применялась самоуплотняющаяся бетонная смесь на мелком заполнителе фракции 5–10 по прочности на сжатие бетона марки В40. Совместная работа плит перекрытий между собой обеспечена посредством устройства продольных монолитных шпонок из того же бетона. Для получения достоверных результатов, а также исключения случайных ошибок изготовления моделей испытано 2 идентичных модели перекрытий каждого вида (всего испытано 4 модели).

Для каждой партии заливки бетона моделей подготовлено 3 образца-куба со стороной 10 см для определения прочностных характеристик материала на момент испытания для последующего анализа и численного моделирования.

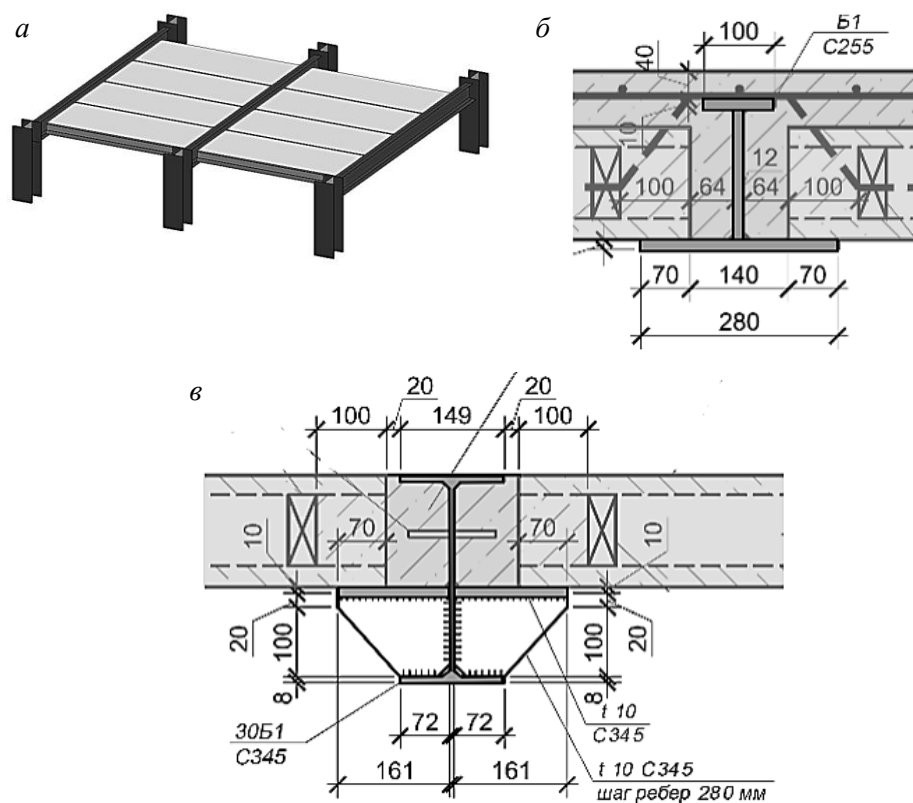


Рис. 2. Схема модели перекрытия (а); поперечное сечение средней балки М3.1 со сварным поперечным сечением (б); М3.2 – с прокатным двутавром (в)

Fig. 2. Schematic of floor model (a); cross section of middle beam M3.1 with welded cross section (b); M3.2 with rolled I-beam (c)

Нагружение производилось ступенчато, не более 10 % от контрольной нагрузки по прочности, на каждой ступени осуществлялась выдержка модели. Испытания моделей М1 и М2 выполнены на сдвиг и на чистый изгиб соответственно на гидравлических тарированных прессах ИПС-1000 и ПММ-1000 (MAN1000), моделирующих осевую нагрузку до 1000 тс. Перед нагружением моделей производилась выверка нагрузочных приспособлений относительно разметочных рисок, заранее нанесенных на поверхность конструкции. Чистый изгиб в балках моделировался путем приложения нагрузки в 1/3 и 2/3 пролета. Шарнирное опирание балок обеспечивалось их установкой на инвентарные шарнирно-подвижные опоры каткового типа. Испытания полноразмерных фрагментов конструкции группы М3 выполнены на силовом полу. Нагрузка прикладывалась равномерно по всей площади конструкции посредством размещения штучных калиброванных грузов.

Результаты

Работа конструкции на сдвиг по контактной зоне «сталь – бетон».
Согласно п. 9.2.2.3 СП 266.1325800.2016 расчетное сопротивление сдвигу τ_{rd}

контактной зоны «сталь – бетон» для неокрашенных поверхностей без окислы и ржавчины составляет 0,3 МПа для полностью обетонированных профилей и 0,2 МПа для частично обетонированных сечений полок. Данные значения приняты в своде правил в запас несущей способности и по аналогии с такими же величинами в Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. При площади 3250 см² контактной зоны «сталь – бетон» (рис. 3, а) в изученных моделях расчетная несущая способность составит $S_t = 106$ кН. Данная величина соответствует моделям группы М1.1 без упоров и армирования бетонной части.

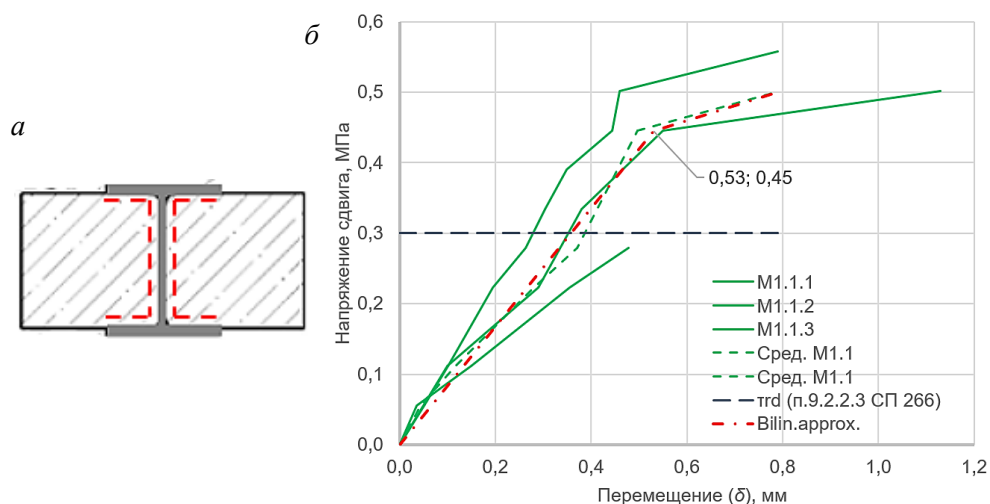


Рис. 3. Периметр сдвиговой поверхности «сталь – бетон» (а); кривые перемещения – напряжения сдвига для моделей М1.1 (без упоров и арматуры) (б)

Fig. 3. Perimeter of steel-concrete contact area (a); displacement-shear stress curves in models M1.1 (without supports and reinforcement) (b)

На рис. 3, б представлены напряжения сдвига по контактной зоне «сталь – бетон» для моделей группы М1.1 без упоров и арматуры. Видно, что все испытанные модели достигли значения $\tau_{rd} = 0,3$ МПа, установленного СП 266.1325800.2016, а две модели на 30 % превысили его. Когда перемещение сдвига контактной поверхности достигает 0,5 мм, происходит резкое ухудшение ее работы, а при перемещении более 0,8 мм – полное разрушение. При работе контактной зоны «сталь – бетон» без соединительных устройств расчетное сопротивление $\tau_{rd} = 0,3$ МПа, установленное нормами, дает необходимый запас около 30 % для бетонов класса прочности на сжатие В30 и выше.

Для случаев, когда прочность сцепления стали и бетона не достаточна для восприятия нагрузки от сдвига, устанавливаются гибкие или жесткие упоры, которые проектируются согласно требованиям раздела 9.2 СП 266.1325800.2016. Для упоров из круглой арматурной стали А500С диаметром 10 мм и длиной 50 мм несущая способность P_{rd} одного упора определяется по формуле

$$(P_{rd} = d_{an}^2 \sqrt{10R_b}) \quad (1)$$

и для бетона класса В30 составляет 13 кН. Обратим внимание, что в формуле (1) отсутствует прочность стали анкера, т. к. считается, что анкер в данном случае намного прочнее, чем анкерование стержня в бетоне.

По аналогии с Eurocode 4 в пункте 9.2.2.5 СП 266.1325800.2016 введено допущение о возможности учета сил трения, которые возникают между внутренней поверхностью полки двутавра и бетоном. При наличии упора на стенке двутавра считается, что бетон имеет ограниченное боковое расширение при взаимодействии с упором и прижимается к внутренней поверхности полки двутавра, тем самым добавляя несущую способность упору. Дополнительную несущую способность определяют по формуле $\mu P_{rd}/2$, где $\mu = 0,5$ – коэффициент трения стальной поверхности о бетон. Для одного упора такая добавка составит 3,25 кН, для восьми упоров (как в испытанных моделях) – 26 кН. Таким образом, полная несущая способность контактной зоны «сталь – бетон» составит 210 кН с учетом наличия анкеров и сцепления между сталью и бетоном и 236 кН с учетом наличия анкеров, сцепления и дополнительных сил трения с внутренней поверхностью профиля. Эти величины и будем сравнивать с экспериментальными данными.

На рис. 4 приведены графики перемещений моделей М1.2 и М1.3, которые имеют дополнительные устройства сцепления между сталью и бетоном в виде восьми арматурных стержней, приваренных к стенке. Видно, что перемещения моделей работают практически идентично независимо от наличия арматуры в бетоне (М1.3). На графике четко выделяется линейная зависимость «перемещение – нагрузка» до величины $\sim 1,3$ мм. При увеличении нагрузки идет плавное нарастание прогибов, и при достижении 6 мм перемещения происходит полное разрушение контактной зоны «сталь – бетон».

Надежная работа соединения в виде арматурных анкеров фиксируется для всех моделей при перемещении до 2 мм. Для масштабного сравнения на рис. 4 красным пунктиром показана осредненная диаграмма работы для моделей группы М1.1 без упоров. Видно, что установка 8 упоров увеличивает линейную работу контактной зоны с 157 кН (для М1.1) до ~ 500 кН, т. е. в 3,2 раза. В отличие от моделей М1.1, где разрушение наступает хрупко, в моделях М1.2 и М1.3 перемещения имеют пластический характер. На рис. 4 проведены горизонтальные пунктирные линии, которые соответствуют нормативной (210 кН) несущей способности анкерных упоров P_{rd} согласно (1), а также с учетом работы сил трения (236 кН) согласно п. 9.2.2.5 СП 266.1325800.2016. Видно, что, если учитывать только условную линейную работу, фактическая несущая способность моделей более чем в 2,3 раза выше, чем по (1), и в 2,1 раза выше, чем по п. 9.2.2.5 при учете сил трения.

На рис. 5 приведена осредненная по каждой группе диаграмма работы одного упора в испытанных моделях. При осреднении полученных диаграмм более четко выделяется условно линейный участок диаграммы работы упора (на перемещениях до 1,4 мм) для групп моделей М1.2 и М1.3. В условиях линейной работы несущая способность одного анкера составляет 65 кН, что в 5 раз больше, чем по (1), и в 4 раза больше, чем по п. 9.2.2.5 при учете сил трения по боковым внутренним граням полки.

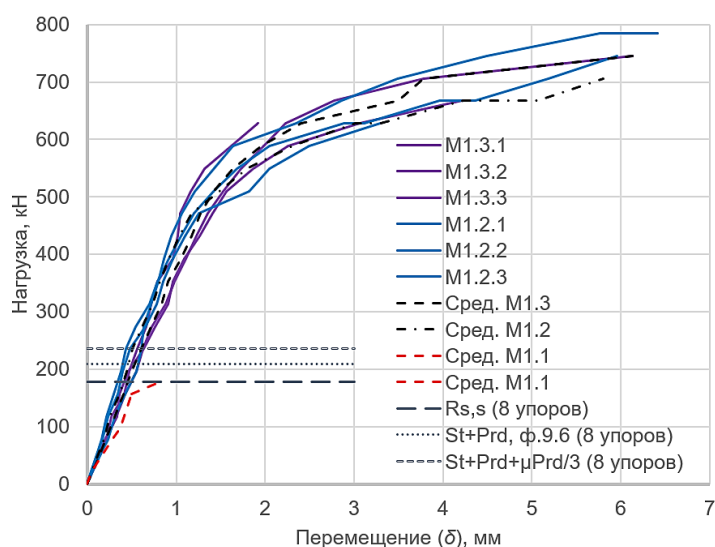
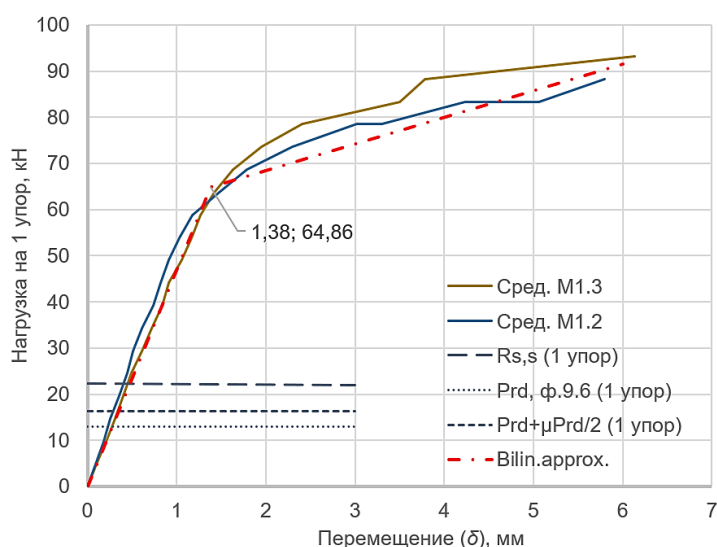


Рис. 4. График «перемещение – нагрузка» для моделей M1.2, M1.3

Fig. 4. Displacement-load curves for models M1.2 and M1.3

Рис. 5. График «перемещение – нагрузка» для одного упора (D10 A500C, $L = 50$ мм, B30), установленного на стенку двутавраFig. 5. Displacement-load curves for one support (D10 A500C, $L = 50$ mm, B30) mounted to I-beam wall

Не наблюдается повышения несущей способности при дополнительном продольном армировании зоны вблизи анкеров (модель M1.3) по сравнению с аналогичными моделями с анкерами, но без продольной арматуры (модель M1.2). Поэтому при необходимости включения в работу конструкции контактной зоны «сталь – бетон» внутри двутавра (между внутренними поверхностями

полок) достаточно установки анкеров согласно конструктивным положениям СП 266.1325800.2016 без дополнительного продольного армирования.

Для дальнейших расчетов численного моделирования необходимо корректно построить модель взаимодействия контактной поверхности «сталь – бетон». Для моделирования взаимодействия стали и бетона на рис. 5 построена билинейная аппроксимационная модель, представленная красным штрихпунктиром. Модель построена для осредненных значений графика «перемещение – напряжение», а ее уравнения можно записать в виде

$$\begin{cases} \tau_{rd} = 0,84\delta & \text{при } 0 < \delta \leq 0,53; \\ \tau_{rd} = 0,19\delta + 0,35 & \text{при } 0,53 < \delta < 0,8, \end{cases} \quad (2)$$

где τ_{rd} принимается в МПа; δ – в мм.

При наличии упоров в расчетных схемах можно учитывать и их работу в конструкции путем соответствующих аппроксимационных зависимостей. Параметры модели представлены следующими простейшими уравнениями:

$$\begin{cases} P_{rd} = 47\delta & \text{при } 0 < \delta \leq 1,4; \\ P_{rd} = 5,7\delta + 57 & \text{при } 1,4 < \delta < 6, \end{cases} \quad (3)$$

где P_{rd} принимается в кН; δ – в мм.

Обратим внимание, что данные зависимости справедливы только для тех случаев, когда упоры установлены по стенке профиля согласно требованиям соответствующих разделов СП 266.1325800.2016 и имеют вид стержней из арматуры А500С. Для других устройств сцепления (например, в виде стандартных стад-болтов с высаженными головками) зависимости будут несколько иными и потребуют дополнительного экспериментального обоснования. Отметим, что параметры контактной зоны «сталь – бетон», выявленные в других источниках [17, 19, 16, 8], определяли работу анкерной связи в свободном массиве бетона, т. е. когда массив бетона не имел ограничений сбоку от внутренней поверхности полка двутавра. Данное обстоятельство повышает степень связности по контактной зоне «сталь – бетон» и должно учитываться при численно-аналитическом моделировании.

Работа сжатого бетона сборных плит. Наиболее интересен анализ распределения напряжений в стали и железобетоне полноразмерных перекрытий. Практический интерес представляет ширина сжатого бетона, вовлекаемого в работу комбинированной балки. Данная величина нормирована в табл. 4.1 СП 266.1325800.2016 и зависит от пролета балки, расстояния между параллельными балками, толщины плиты t_{sl} . Для испытания перекрытий МЗ.1 и МЗ.2 расчетная ширина свеса плиты определяется по формуле $b_{sl} = a + 6t_{sl}$, где a – ширина свеса полки стального двутавра. Расположение датчиков, с помощью которых фиксировались напряжения в элементах комбинированных балок, приведено на рис. 6. Напряжения в тензодатчиках фиксировались на каждой ступени нагружения, таким образом получились эпюры изменения распределения напряжений в зависимости от предельной нагрузки на перекрытия.

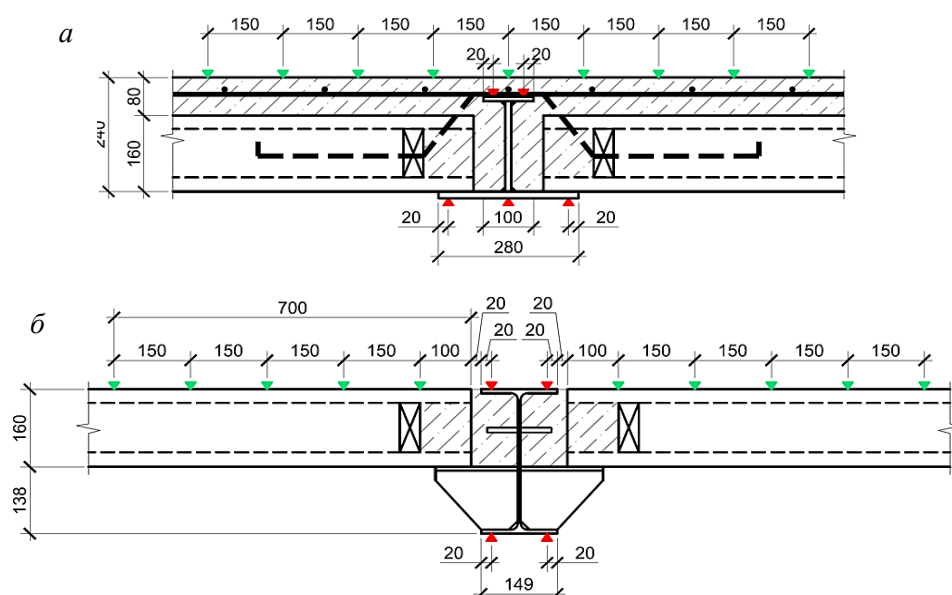


Рис. 6. Расположение тензодатчиков на стальных и бетонных элементах в середине пролета средней балки перекрытий для моделей М3.1 (а) и М3.2 (б)

Fig. 6. Arrangement of strain sensors on steel and concrete elements at the span center of the central floor beam in models M3.1 (a) and M3.2 (b)

На рис. 7 и 8 приведены распределения напряжений на верхней поверхности сжатого бетона в моделях перекрытий М3.1.1 и М3.2.1.

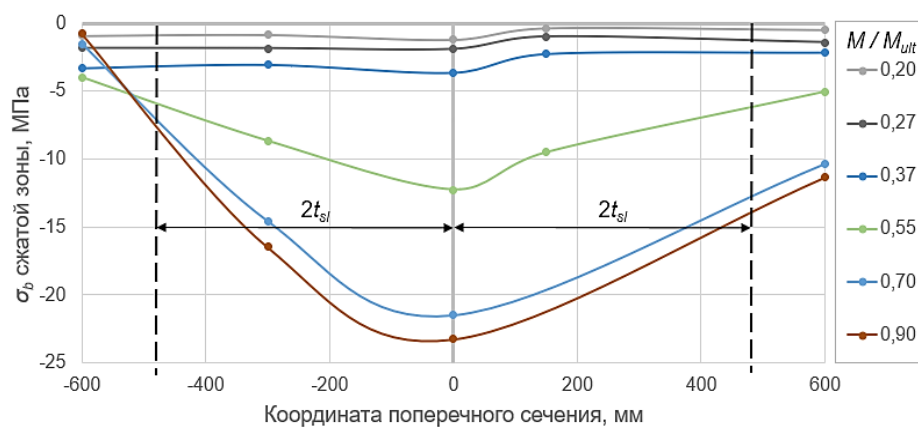


Рис. 7. Распределение напряжений на верхней поверхности бетона средней комбинированной балки модели М3.1.1

Fig. 7. Stress distribution on the upper concrete surface of central beam in model M3.1.1

На первых этапах нагружения для модели М3.1.1 (с набетонкой поверх сборных плит) характерно равномерное распределение напряжений от 0 до $0,4 M/M_{ULT}$ по поверхности; напряжения сжатия в бетоне не превышают 5 МПа. На дальнейших этапах нагружения эпюра приобретает форму параболы с мак-

симумом напряжений по оси балки. На последних этапах работы перекрытия при $0,9 M/M_{ULT}$ максимальные напряжения в бетоне достигают 23,25 МПа, что составляет 62 % от расчетного (37 МПа) сопротивления бетона на сжатие (для условного класса В43). Заметим, что напряжения плавно убывают от оси балки к периферии, и на расстоянии 600 мм от оси (где фиксировались напряжения тензодатчиками) они в разы ниже, чем в осевой зоне.

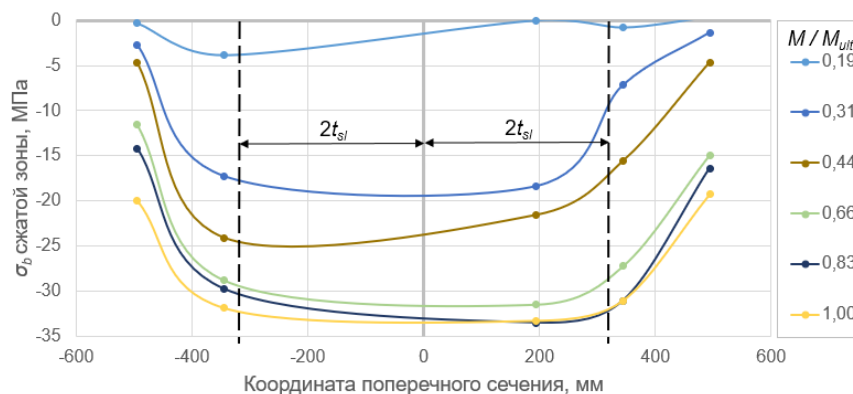


Рис. 8. Распределение напряжений на верхней поверхности бетона средней комбинированной балки модели М3.2.1

Fig. 8. Stress distribution on the upper concrete surface of central beam in model М3.2.1

Для модели М3.2.1 (с опиранием сборных плит в середине стенки двутавровой балки) характерно более равномерное распределение напряжений при удалении от осевой зоны (рис. 8). В отличие от модели М3.1.1 с набетонкой уже при нагрузке 0,3–0,44 M/M_{ULT} напряжения на верхней поверхности сжатого бетона достигают 24,1 МПа (75 % от $R_b = 31,875$ МПа). На дальнейших этапах нагружения, вплоть до разрушения конструкции, напряжения в бетоне достигают максимального значения 33,5 МПа (105 % от $R_b = 31,875$ МПа), когда бетон плит начинает разрушаться. Отмечается иной вид эпюры напряжений в виде пологой криволинейной диаграммы, далекой по очертанию от параболы, как было в модели с набетонкой (рис. 7). Напряжения сжатия в бетоне начинают резко убывать на расстоянии 400 мм от оси.

Для двух моделей характер изменения напряжений в зависимости от приложенной нагрузки также различен. На рис. 9 представлены графики изменения напряжений в тензодатчиках в зависимости от действующего момента в балке для моделей М3.1 и М3.2. Обозначение датчика содержит его координату. Например, датчик Т6 (2-3) 150 располагается на расстоянии 150 мм от оси балки и т. д. Ступенчатость графиков обусловлена поэтапным приложением нагрузки. На рис. 9, а видно, что для модели перекрытий с набетонкой характерен линейный рост напряжений в бетоне с увеличением действующего момента в комбинированной балке. Графики напряжений хорошо аппроксимируются линейными функциями (цветной пунктир), исходящими из одной точки на оси абсцисс, и располагаются тем ниже, чем дальше находится датчик от осевой зоны комбинированной балки (см. синий пунктир для датчика с координатой

0 мм и оранжевый пунктир для датчика с координатой 600 мм). Для модели без набетонки (рис. 9, б) графики изменения напряжений не могут быть линейно аппроксимированы и существенно отличаются в зависимости от расстояния до оси балки. Напряжения в датчиках на расстоянии 194,5 и 344,5 мм (синяя и оранжевая линии) от оси балки растут более интенсивно, чем датчики на расстоянии 494,5 мм (серая и желтая линии) от оси. В датчиках, наиболее удаленных от оси балки (серая и желтая линии), напряжения растут незначительно по закону, близкому к линейному. Таким образом, выявлена принципиальная разница в распределении напряжений сжатия в бетоне в процессе нагружения в зависимости от конструктивного решения комбинированного перекрытия.

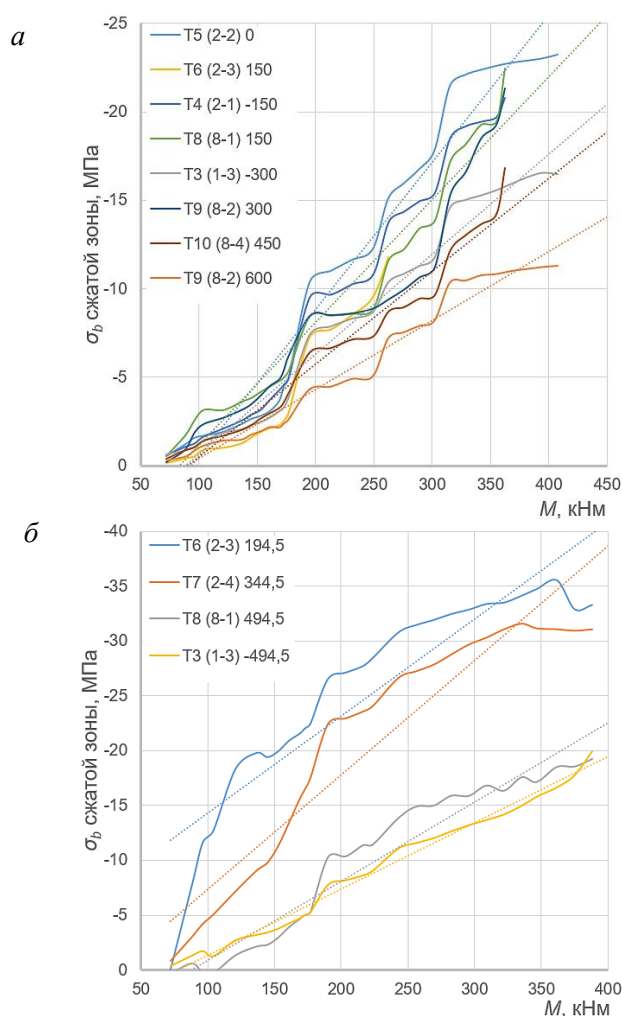


Рис. 9. Графики изменения напряжений в тензодатчиках в зависимости от действующего момента в балке:

а – модель М3.1; б – модель М3.2

Fig. 9. Strain curves depending on the moment in the beam:

а – M3.1 model; б – M3.2 model

Численное моделирование. В ходе анализа результатов испытаний и измерений напряжений в комбинированных перекрытиях установлено, что нормативное значение расчетной ширины свеса плиты b_{sl} по табл. 4.1 СП 266.1325800.2016 дает существенно завышенные значения данного свеса. Так, для моделей перекрытия МЗ.1 с набетонкой и МЗ.2 нормативный свес полки сжатого бетона равен соответственно 1490 и 1035 мм. С учетом полученных эпюр распределения напряжений в середине пролета балок (рис. 2, 3), а также по выявленным закономерностям их изменения в зависимости от расстояния от оси балки (рис. 4) можно заключить, что на расстоянии, равном нормативному свесу полки b_{sl} , напряжения сжатия равны или близки к нулю. Эффективно вовлекаются в работу комбинированной конструкции участки плиты, расположенные на расстоянии $2t_{sl}$ от оси балки. Данная ширина свеса указана на рис. 3 вертикальными пунктирными красными линиями.

Таким образом, табл. 4.1 СП 266.1325800.2016 требует актуализации в части учета конструктивных особенностей сталежелезобетонных перекрытий (комбинированных балок) с использованием сборных пустотных плит. Отметим, что фактические распределения напряжений в сжатой полке несколько отличаются от численных моделей, в особенности тех, для которых смоделированы отдельные балки [12, 13, 15, 16.]. Это связано в первую очередь с тем, что численные и аналитические модели, не проверенные экспериментальными данными, не могут учитывать весь комплекс сложных взаимодействий, возникающих между сталью, монолитным и сборным железобетоном.

Для отработки правил моделирования сложных сталежелезобетонных конструкций со сборным железобетоном проведено численное моделирование испытанных перекрытий с использованием препроцессора GID 14.0.1 и программного комплекса ATENA 5.6.1b [6]. При моделировании создавалась объемная пространственная модель средней балки перекрытия с монолитным бетонированием и сборными плитами перекрытий. Плиты моделировались до середины собственного пролета с наложением соответствующих связей. Материалы стальной балки, монолитного и сборного железобетона моделировались в соответствии с данными испытаний стандартных образцов материалов. Диаграмма работы бетона принята трехлинейной, работы стали – по Прандтлю. Ввиду того, что балка перекрытия работает в вертикальной плоскости вдоль своей оси, предварительное напряжение арматурной проволоки сборных плит не учитывалось. По всей поверхности соприкосновения стали и монолитного бетона задавалась нелинейная контактная работа между сталью и бетоном согласно (2) и рис. 3, б. Параметры контактного слоя заданы с учетом настоящих исследований, работы [4], а также рекомендаций СП 266.1325800 и EN 1994-1-1:2004: Eurocode 4. Трение и адгезия между сборными и монолитными конструкциями не учитывались. При моделировании конструкций в программном комплексе ATENA создан контактный слой конечных элементов, а также соответствующий материал, который описывал характер их работы. Модель Interface Material Model для элементов контактного слоя основана на критерии Мора – Кулона [6].

При разрушении экспериментальных моделей и их обследовании после испытаний установлено, что отсутствуют отслоения стяжки от поверхности сборной плиты и швов заполнения между плитами. Разрушения отмечаются

только в местах конструкции, где сталь примыкает к монолитному бетону, что и учтено моделированием контактной зоны «сталь – бетон». Для модели генерируется тетраэдрическая сетка с предварительной отработкой шага разбиения. Шаг разбиения модели на конечные элементы подбирается так, чтобы между двумя шагами сгущения сетки разница в расчетах не превышала 0,5 % по прогибам и напряжениям в характерных точках. На рис. 10 показаны выборочные расчетные численные модели.

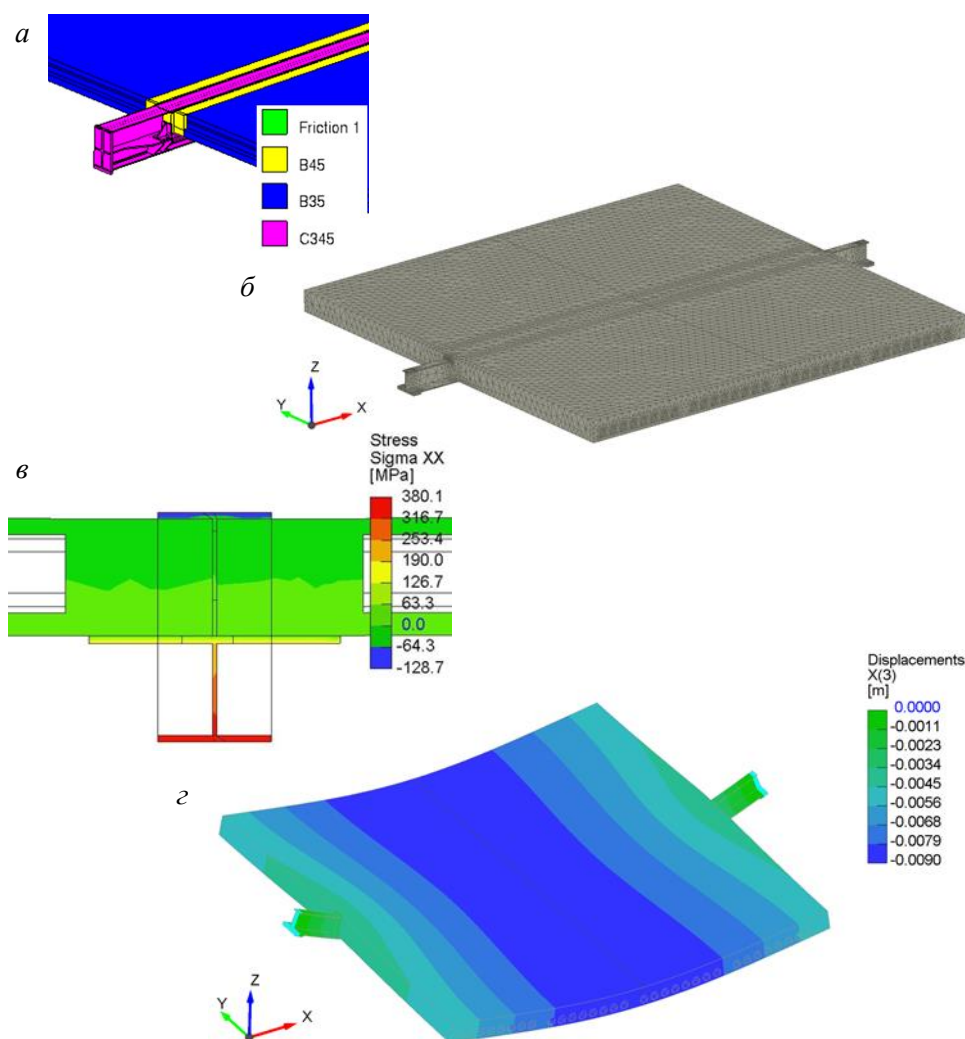


Рис. 10. Численное моделирование перекрытий:

a – опорная часть перекрытия М3.2 и материалы; *б* – общий вид модели перекрытия М3.1; *в* – напряжения в поперечном сечении в момент, близкий к разрушению перекрытия М3.2; *г* – общий вид деформированного перекрытия М3.1

Fig. 10. FEM of floors:

a – support and materials of M3.2 model; *b* – general view of M3.1 model; *c* – cross-sectional stresses at the moment close to fracture of M3.2 model; *d* – general view of deformed M3.1 model

Согласно данным рис. 11, сходимость результатов по прогибам удовлетворительная при учете работы сдвиговой контактной зоны «сталь – бетон». Разница в прогибах при нагрузках, близких к моменту разрушения конструкции, не превышает 17 %. Эта разница обусловлена отклонениями фактической прочности материалов от отклонений, принятых в результате испытания и осреднения стандартных образцов стали и бетона. В основном прогибы перекрытий близки или меньше полученных в результате численного моделирования. Учет нормативных и расчетных значений прочностных характеристик материалов даст дополнительный запас при численном моделировании. Предложенная схема моделирования конструкций позволяет достоверно учитывать особенности работы сталежелезобетонных конструкций со сборными элементами.

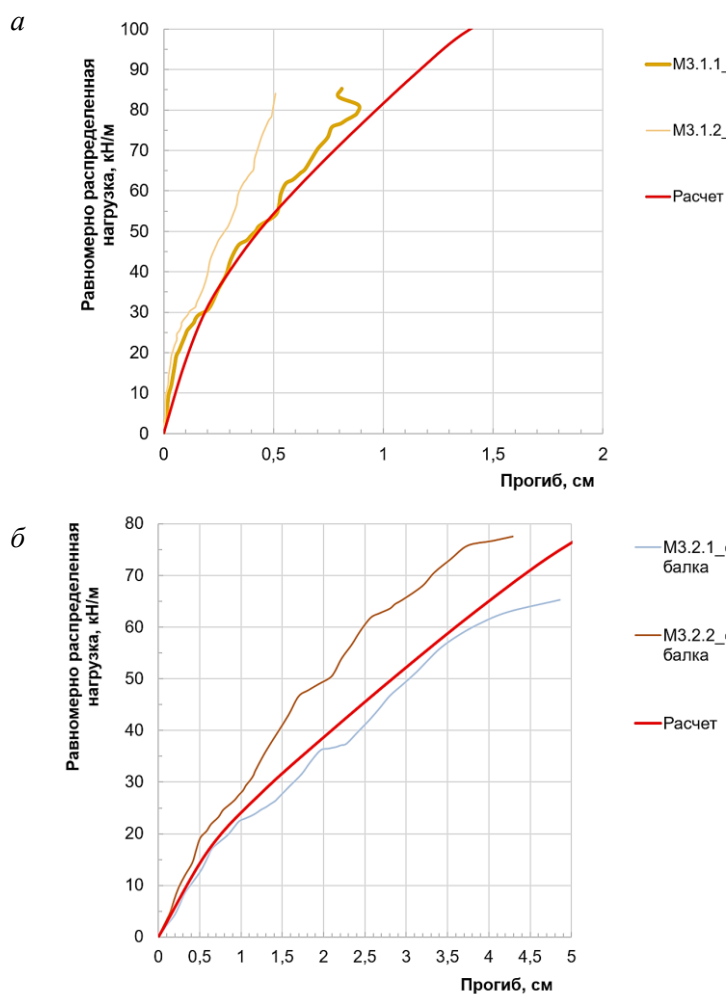


Рис. 11. Зависимость нагрузки и прогиба для численных и экспериментальных моделей М3.1 (а) и М3.2 (б)

Fig. 11. Load-bending dependences for numerical and experimental models M3.1 (a) and M3.2 (b)

Выводы

1. При работе контактной зоны «сталь – бетон» конструкции без соединительных устройств значение нормативного расчетного сопротивления $\tau_{rd} = 0,3$ МПа дает необходимый запас $\sim 30\%$ для бетонов класса прочности на сжатие В30 и выше.

2. Надежная работа контактной зоны «сталь – бетон» в виде арматурных анкеров фиксируется для всех моделей при перемещении до 2 мм. Установка упоров в частично обетонированных конструкциях увеличивает линейную работу контактной зоны в среднем в 3,2 раза. В отличие от модели M1.1, где разрушение наступает хрупко, в моделях M1.2 и M1.3 перемещение имеет пластический характер.

3. Настил из сборных плит, не жестко прикрепленный (отсутствует сварка или болты) к стальной балке, вовлекает в работу стальной балки полку шириной $2t_{sl}$, что более чем в 3 раза меньше нормативного значения $a + 6t_{sl}$. Требуется корректировка положений СП 266.1325800.2016 в части ширины свеса полки сжатого бетона, учитываемого при расчете конструкции.

4. При численном моделировании сталежелезобетонных конструкций со сборными элементами следует учитывать контактное взаимодействие «сталь – бетон», параметры которого изучены в настоящей работе для получения достоверных данных о прогибах и напряжениях, возникающих в бетоне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rackham J.W., Hicks S.J., Newman G.M. Design of asymmetric slimfloor beams with precast concrete slabs // The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2006. 101 p. (SCI Publication P342).
2. 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).
3. 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.
4. Травуш В.И., Каприелов С.С., Конин Д.В. и др. Определение несущей способности на сдвиг контактной поверхности «сталь – бетон» в сталежелезобетонных конструкциях для бетонов различной прочности на сжатие и фибробетона // Строительство и реконструкция. 2016. № 4 (66). С. 45–55.
5. 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.
6. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Prague, 2018. January 26. 324 p.
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 (8), 4230. URL: <https://doi.org/10.3390/su13084230>
8. Goralski C. 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. Lam D. Composite steel beams using precast concrete hollow core floor slabs : PhD Thesis. University of Nottingham, UK, 1998. 303 p.

11. Lam D. Designing composite beams with precast hollow-core slabs to Eurocode 4 // *Advanced Steel Construction*. 2007. V. 3. № 2. P. 594–606.
12. Salama T., Nassif H.H. Effective flange width for composite steel beams // *The Journal of Engineering Research*. 2011. V. 8. № 1. P. 28–43.
13. Tusnin A.R., Kolyago A.A. Features of finite element analysis of steel-reinforced concrete slabs from hollow core slabs // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. № 456. 012095. 6 p.
14. Way A.G.J., Cosgrove T.C., Brett M.E. Precast concrete floors in steel framed buildings // The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot. Berkshire, 2007. 101 p. (SCI Publication P351).
15. 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.
16. Веселов А.А., Чепилко С.О. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонной балки // *Вестник гражданских инженеров*. 2010. № 2 (23). С. 31–37.
17. Замалиев Ф.С. К оценке прочности анкерных связей изгибаемых сталежелезобетонных элементов // *Известия КГАСУ*. 2015. № 1 (31). С. 80–85.
18. Замалиев Ф.С., Филиппов В.В. Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 7. С. 29–36.
19. 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.
20. Tusnin A.P., Kolyago A.A. Конструкция и работа сталежелезобетонного перекрытия с использованием сборных пустотных железобетонных плит // *Современная наука и инновации*. 2016. № 3. С. 141–147.

REFERENCES

1. Rackham J.W., Hicks S.J., Newman G.M. Design of asymmetric slimfloor beams with precast concrete slabs. The Steel Construction Institute. Silwood Park, Ascot, Berkshire, 2006. 101 p.
2. Lawson R.M., Ogden R.J., Rackham J.V. Steel in multi-storey residential buildings. Institute of Steel Structures. Silwood Park, Ascot, Berkshire, 2004. 68 p.
3. Ahmed I.M., Tsavdaridis K.D., Ahmed I.M. The evolution of composite flooring systems: Applications, testing, modelling and Eurocode design approaches. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; (155): 286–300.
4. Travush V.I., Kaprielov S.S., Konin D. V., et al. Shear bearing capacity of steel-concrete contact surface in steel-reinforced concrete structures for concrete of different compressive strength and fiber concrete. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016; 4 (66): 45–55. (In Russian).
5. 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.
6. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA program documentation. Part 1. Theory. Prague, 2018. 324 p.
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 (8): 4230. DOI: 10.3390/su13084230
8. Goralski C. Concrete-steel interaction in reinforced composite beams. PhD Thesis. 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.
10. Lam D. Composite steel beams using precast concrete hollow core floor slabs. PhD Thesis. University of Nottingham, UK, 1998. 303 p.
11. Lam D. Designing composite beams with precast hollowcore slabs to Eurocode 4. *Advanced Steel Construction*. 2007; 3 (2): 594–606.

12. Salama T., Nassif H.H. Effective flange width for composite steel beams. *The Journal of Engineering Research*. 2011; 8 (1): 28–43.
13. Tusnin A.R., Kolyago A.A. Features of finite element analysis of steel-reinforced concrete slabs from hollow core slabs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; (456): 6.
14. Way A.G.J., Cosgrove T.C., Brett M.E. Precast concrete floors in steel framed buildings. The Steel Construction Institute. Silwood Park, Ascot, Berkshire, 2007. 101 p.
15. Borovikov A.G., 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)
16. Vezelov A.A., Chepilko S.O. Stress-strain state of steel-reinforced concrete beam. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2010; 2 (23): 31–37. (In Russian)
17. Zamaliev F.S. Strength of anchor bonds of bent steel-reinforced concrete elements. *Izvestiya KGASU*. 2015; 1 (31): 80–85. (In Russian)
18. 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)
19. Zamaliev F.S., Bikinin E.G., et al. Initial stress-strain state of steel-reinforced concrete beams and plates. *Izvestiya KGASU*. 2015; 2 (32): 149–153. (In Russian)
20. 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)

Сведения об авторе

Конин Денис Владимирович, канд. техн. наук, ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко АО «НИИ «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, konden@inbox.ru

Author Details

Denis V. Konin, PhD, Kucherenko Central Research Institute for Structural Construction, 6, 2-ya Institutskaya Str., 109428, Moscow, Russia, konden@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 01.06.2023
Одобрена после рецензирования 12.06.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 01.06.2023
Approved after review 12.06.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 116–128.

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 (4): 116–128.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.071.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-116-128

EDN: BNSNAI

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЯ ИЗГИБНО-ЖЕСТКОЙ НИТИ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ

Денис Александрович Тарасов

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В настоящее время одной из основных задач при проектировании зданий и инженерных сооружений является создание оптимальных конструкций, обладающих наилучшими экономическими показателями, такими как минимальная материалоемкость и, соответственно, стоимость.

Цель настоящего исследования заключается в создании методики, дающей возможность определять оптимальные геометрические параметры поперечного сечения изгибно-жесткой нити, обеспечивающие минимум потенциальной энергии деформации, для достижения требований по минимальному весу, исходя из ограничений по прочности и жесткости проектируемого элемента.

Проблема поиска оптимальных параметров сведена к задаче нелинейного математического программирования с применением энергетического критерия. В качестве энергетического критерия выступало условие о достижении минимума потенциальной энергии деформации рассчитываемого элемента.

Результаты. Дана оценка адекватности результатов, получаемых с помощью разработанной методики. Проведен численный эксперимент по определению оптимальных геометрических характеристик поперечного сечения изгибно-жесткой нити. Установлено, что расхождения в значениях результатов, полученных предложенной технологией моделирования и общепризнанным методом конечных элементов, незначительны и находятся в рамках погрешности вычислений.

Выводы. Предложенная методика дает возможность решать в геометрически нелинейной постановке обратные задачи, в числе которых поиск оптимальных геометрических характеристик элементов, совмещающих работу балок и гибких нитей. Кроме того, это может найти применение на стадии проектирования большепролетных покрытий общественных зданий и инженерных сооружений.

Ключевые слова: условная оптимизация, нелинейное программирование, изгибно-жесткая нить, обратная задача, энергетический критерий, геометрическая нелинейность, расчет по деформированной схеме, потенциальная энергия деформации

Для цитирования: Тарасов Д.А. Оптимизация геометрических характеристик сечения изгибно-жесткой нити на основе энергетического критерия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 116–128. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-116-128. EDN: BNSNAI

ORIGINAL ARTICLE

CROSS-SECTION GEOMETRY OPTIMIZATION
OF FLEXURAL THREAD USING ENERGY CRITERION

Denis A. Tarasov

Penza State University, Penza, Russia

Abstract. Purpose: The aim of this work is to develop a method to determine the best geometrical parameters of the flexural thread cross-section providing the lowest potential energy of deformation, thereby meeting the requirements for the minimum weight based on strength and rigidity limitations on the designed element.

Methodology/approach: The problem of calculating the best parameters is reduced to non-linear mathematical programming using the energy criterion. The latter provides to gain the minimum potential energy of deformation of the designed element.

Research findings: The proposed methodology allows evaluating the results obtained. The numerical experiment determines the optimum cross-section geometry of flexural thread. The spread in values between proposed methodology and finite element method are insignificant.

Practical implications: The proposed method provides the solution of inverse problems in a geometrically nonlinear formulation, including a search for optimum geometrical parameters of elements that combine the operation of beams and flexural thread. The proposed method can be used at the design stage of large-span shells of buildings.

Keywords: constrained minimization, non-linear programming, flexural thread, inverse problem, energy criterion, geometric nonlinearity, structural analysis strain state, potential energy of deformation

For citation: Tarasov D.A. Cross-section geometry optimization of flexural thread using energy criterion. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 116–128. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-116-128. EDN: BNSNAI

Актуальность. При проектировании зданий и инженерных сооружений одной из основных задач является создание оптимальных конструкций, обладающих наилучшими экономическими показателями, такими как минимальная материалоемкость, а соответственно, и стоимость [1, 2].

В задачах оптимизации, рассмотренных в работах [3, 4], гибкая нить характеризовалась одним параметром – площадью поперечного сечения, форма и размеры которого оставались неопределенными. Особенностью данного вида стержня является то, что он способен воспринимать исключительно растягивающие усилия. В связи с этим изменение формы сечений реальных конструкций, для которых гибкая нить является расчетной моделью, не приводит к переоценке распределения возникающих усилий и деформаций по длине рассчитываемого элемента. Для нитей, обладающих жесткостью на изгиб, которые могут воспринимать изгибающие моменты, задача оптимизации усложняется. Число параметров, от которых зависит напряженно-деформированное состояние, увеличивается. Наряду с площадью, появляются момент сопротивления и момент инерции сечения. Эти величины входят в условия прочности, жесткости и неразрывности деформаций, ограничивающие область допустимых решений [5, 6].

Цель. Сформулируем цель исследования следующим образом. Необходимо разработать методику, дающую возможность определять оптимальные

геометрические параметры, характеризующие форму поперечного сечения изгибно-жесткой нити, обеспечивающие минимум потенциальной энергии деформации, что позволяет достичь требований по минимальному весу, исходя из ограничений по прочности и жесткости проектируемого элемента.

Предметом исследования является методика, позволяющая решить поставленную задачу.

В качестве объекта исследования выступают элементы конструкций большепролетных покрытий инженерных сооружений и общественных зданий, для которых изгибно-жесткая нить является расчетной моделью [7, 8].

Материалы и методы. На рис. 1 показана расчетная модель нити, обладающей некоторой жесткостью на изгиб, пролетом l с первоначальной стрелой провеса от собственного веса f_0 , закрепленной на упругоподатливых опорах с жесткостью i , которые, в свою очередь, лежат на хорде AB , расположенной под углом β к горизонту. Деформированное состояние нити вызвано действием равномерно распределенной нагрузки q , приложенной на произвольном участке шириной n .

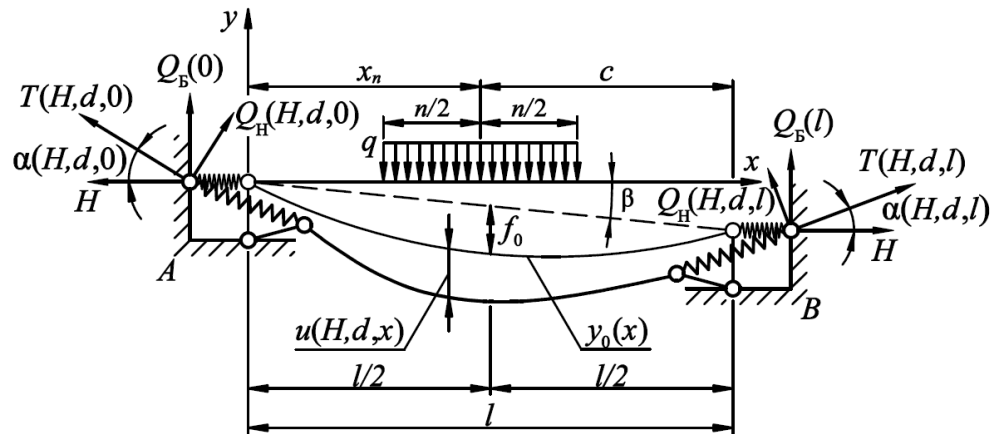


Рис. 1. Расчетная модель изгибно-жесткой нити

Fig. 1. Design model of flexural thread

В качестве параметров в задаче оптимизации будут выступать геометрические характеристики, однозначно определяющие поперечное сечение. Для сечения в виде кольца данными характеристиками являются внутренний и внешний диаметры.

Для дальнейшего нахождения той части параметров поперечного сечения, которые входят в расчетные формулы напряжений и деформаций и тем самым определяют поведение изгибно-жесткой нити под нагрузкой, потребуется безразмерная величина

$$m = \frac{d}{D}, \quad (1)$$

где d – внутренний диаметр, м; D – внешний диаметр, м.

При заданном значении отношения (1) момент инерции, площадь и момент сопротивления сечения можно записать в виде функциональных зависимостей от внутреннего диаметра кольца:

$$J(d) = \frac{\pi \left(\frac{d}{m}\right)^4}{64} (1 - m^4); \quad (2)$$

$$A(d) = \frac{\pi \left[\left(\frac{d}{m}\right)^2 - d^2 \right]}{4}; \quad (3)$$

$$W(d) = \frac{\pi \left(\frac{d}{m}\right)^3}{32} (1 - m^4). \quad (4)$$

Известно, что при решении задач проектирования оптимальных несущих конструкций, обеспечивающих минимум веса и стоимости, часто используется интегральный энергетический критерий минимума потенциальной энергии деформации [9, 10, 11]. В связи с этим примем потенциальную энергию деформации в качестве целевой функции [12, 13]:

$$U(H, d) = \int_0^l \frac{M_H(H, d, x)^2}{2E \cdot J(d)} dx + \int_0^l \frac{T(H, d, x)^2}{2E \cdot A(d)} dx + \int_0^l \frac{k \cdot Q_H(H, d, x)^2}{2G \cdot A(d)} dx \rightarrow \min, \quad (5)$$

где H – распор, Н; l – пролет, м; $M_H(H, d, x)$ – функция изгибающего момента, Н·м; x – абсцисса по длине, м; E – модуль упругости материала, Па; $J(d)$ – функция момента инерции сечения, м⁴; $T(H, d, x)$ – функция растягивающего продольного усилия, Н; $A(d)$ – функция площади сечения, м²; k – коэффициент, характеризующий форму поперечного сечения; $Q_H(H, d, x)$ – функция поперечной силы, Н; G – модуль сдвига, Па.

В параметры целевой функции (5) наряду с внутренним диаметром кольца добавлен распор, поскольку он также не известен на момент решения задачи оптимизации.

Запишем требования, которым должна удовлетворять реальная конструкция. Прежде всего, условие прочности [14]. Для этого необходимо определить напряженное состояние рассматриваемого элемента и оценить его. В поставленной задаче напряжения в крайних волокнах заданного сечения по длине не должны превышать расчетного сопротивления материала изгибно-жесткой нити [15]:

$$\sigma(H, d, x_1) \leq R_y, \quad (6)$$

где $\sigma(H, d, x_1)$ – значение функции нормальных напряжений в заданном сечении с абсциссой x_1 , Па; R_y – расчетное сопротивление материала, Па.

Вторым требованием, предъявляемым к конструкции, может являться ограничение величины прогиба в указанной точке рассматриваемого элемента:

$$u(H, d, x_2) \leq [u], \quad (7)$$

где $u(H, d, x_2)$, $[u]$ – значение и предельно допустимая величина прогиба в заданном сечении с абсциссой x_2 , м.

Для определения истинного напряженно-деформированного состояния, возникающего при внешнем силовом воздействии в статически неопределимых системах, необходимо учитывать условие совместности деформаций [16, 17]:

$$L_0 + \Delta L(H, d) = L(H, d), \quad (8)$$

где L_0 – длина до приложения нагрузки, м; $\Delta L(H, d)$ – упругая деформация, м; $L(H, d)$ – длина после приложения нагрузки, м.

Кроме того, при нахождении оптимальных геометрических характеристик поперечных сечений реальных несущих элементов появляются конструктивные ограничения, которые также должны учитываться. В нашем случае будем считать, что данные требования для принятого вида сечения учтены при выборе значения соотношения внутреннего и внешнего диаметров кольца, которое задано.

Для решения поставленной задачи оптимизации необходимо определить все члены целевой функции и уравнений ограничений.

Изгибающий момент в любой точке вдоль оси нити конечной жесткости равен сумме изгибающих моментов всех сил, действующих на нее по одну сторону от абсциссы x рассматриваемого сечения [18, 19]:

$$M_H(H, d, x) = M_B(x) - H(y_0(x) + x \operatorname{tg} \beta + u(H, d, x)), \quad (9)$$

где $M_B(x)$ – функция балочного изгибающего момента, Н·м; $y_0(x)$ – функция линии начального равновесия, м; β – угол наклона хорды AB , град; $u(H, d, x)$ – функция прогиба, м.

Из расчетной модели, представленной на рис. 1, видно, что продольное усилие, растягивающее нить, равно сумме проекций балочной поперечной силы и распора на касательную к конечной линии равновесия [20]:

$$T(H, d, x) = Q_B(x) \sin \alpha(H, d, x) + H \cos \alpha(H, d, x), \quad (10)$$

где $Q_B(x)$ – функция балочной поперечной силы, Н; $\alpha(H, d, x)$ – угол между осью абсцисс и касательной в произвольной точке к линии равновесия нити под нагрузкой, град.

Поперечная сила, воспринимаемая нитью конечной жесткости, определяется из равновесия всех сил, приложенных по одну сторону, на нормаль к касательной конечной линии равновесия, проведенной в точке с абсциссой x [21]:

$$Q_H(H, d, x) = Q_B(x) \cos \alpha(H, d, x) - H \sin \alpha(H, d, x). \quad (11)$$

Функции балочных изгибающего момента и поперечной силы определяются методом сечений:

$$M_B(x) = \frac{q \cdot n \cdot c}{l} x (x \geq 0) - q \frac{\left[x - \left(x_n - \frac{n}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_n - \frac{n}{2} \right) + \\ + q \frac{\left[x - \left(x_n + \frac{n}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_n + \frac{n}{2} \right); \quad (12)$$

$$Q_B(x) = \frac{q \cdot n \cdot c}{l} (x \geq 0) - q \left[x - \left(x_n - \frac{n}{2} \right) \right] \left(x > x_n - \frac{n}{2} \right) + q \left[x - \left(x_n + \frac{n}{2} \right) \right] \left(x > x_n + \frac{n}{2} \right), \quad (13)$$

где n – ширина зоны приложения нагрузки, м; c – расстояние от центра зоны приложения нагрузки до опоры B , м; x_n – абсцисса центра зоны приложения нагрузки, м.

Линию равновесия до приложения нагрузки на нить, обладающей некоторой изгибной жесткостью, с достаточной степенью точности можно представить в виде квадратичной функции [17]:

$$y_0(x) = \frac{4f_0}{l^2} x^2 - \frac{4f_0}{l} x - x \operatorname{tg} \beta, \quad (14)$$

где f_0 – первоначальная стрела провеса в середине пролета, м.

Тригонометрические функции угла между осью абсцисс и касательной в произвольной точке к линии равновесия нити конечной жесткости, находящейся под нагрузкой, определяются геометрическим способом [22]:

$$\sin \alpha(H, d, x) = \frac{\frac{d}{dx}(y_0(x) + u(H, d, x))}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y_0(x) + u(H, d, x)) \right)^2}}; \quad (15)$$

$$\cos \alpha(H, d, x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y_0(x) + u(H, d, x)) \right)^2}}. \quad (16)$$

Для нахождения функции прогиба следует решить уравнение, ранее полученное в работе [22]:

$$E \cdot J(d) \frac{d^2}{dx^2} u(H, d, x) - M_B(x) + H(y_0(x) + x \operatorname{tg} \beta + u(H, d, x)) = 0. \quad (17)$$

Расчет дифференциального уравнения (17) ведется методом последовательных приближений при заданных граничных условиях $u(H, d, 0) = 0$ и $u(H, d, l) = 0$.

Длина нити до приложения нагрузки равна длине дуги кривой, соединяющей ее опорные точки:

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(x) \right)^2} dx. \quad (18)$$

При внешнем воздействии изгибно-жесткая нить удлиняется на величину

$$\Delta L(H, d) = \frac{H}{E \cdot A(d)} \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_B(x) - Q_H(H, d, x)}{H} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx. \quad (19)$$

Длина нити, соответствующая конечному очертанию, равна:

$$L(H, d) = \int_0^{l - \frac{2}{i}H} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} (y_0(x) + u(H, d, x)) \right)^2} dx, \quad (20)$$

где i – жесткость упругоподатливых опор, Н/м.

Нормальные напряжения, возникающие в волокнах, наиболее удаленных от нейтральной оси сечения, являются функцией от абсциссы длины нити и определяются по формулам [22]:

$$\sigma_{\max}(H, d, x) = \frac{T(H, d, x)}{A(d)} + \left| \frac{M_H(H, d, x)}{W(d)} \right|; \quad (21)$$

$$\sigma_{\min}(H, d, x) = \frac{T(H, d, x)}{A(d)} - \left| \frac{M_H(H, d, x)}{W(d)} \right|. \quad (22)$$

Результаты

Проведем численный эксперимент для проверки геометрических характеристик, получаемых с помощью предложенной методики моделирования, на соответствие оптимальным (наилучшим) параметрам поперечного сечения изгибно-жесткой нити, обеспечивающих минимум потенциальной энергии деформации [23]. Данный результат позволяет достичь требований по минимальному весу, исходя из ограничений по прочности и жесткости рассматриваемого элемента.

Объектом исследования будет выступать нить конечной жесткости, выполненная из стальной трубы с соотношением внутреннего диаметра к внешнему $m = 0,9$, с расчетным сопротивлением материала $R_y = 250$ МПа, с первоначальным провесом $f_0 = 1$ м в середине пролета $l = 12$ м, закрепленная на упругоподатливых опорах с жесткостью $i = 50$ МН/м, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой $q = 200$ кН/м с абсциссой $x_n = 6$ м центра ширины $n = 6$ м зоны приложения внешней силы. Точка по длине нити, где нормальные напряжения ограничены расчетным сопротивлением материала, совпадает с максимально нагруженным сечением и расположена в середине пролета. Ограничение на прогиб отсутствует.

В ходе проведения численного эксперимента по разработанной методике при заданных ограничениях, а также физических и геометрических параметрах объекта исследования найдены внутренний и внешний диаметры стальной трубы. Их значения составили $d = 0,58$ и $D = 0,644$ м. Наряду с этим построены эпюры максимальных и минимальных нормальных напряжений, а также прогибов, представленные на рис. 2, а, 3, а и 4, а соответственно.

После этого выполним расчет рассматриваемого элемента с помощью программного комплекса ЛИРА версии 10.10 релиз 2.4, реализованного на общепризнанном методе конечных элементов. По причине того, что подобные коммерческие системы компьютерного моделирования не способны в нелинейной постановке задачи подбирать сечения с наименьшим расходом стали из указанного сортамента профилей, решим прямую задачу по определению напряжений и деформаций принятого объекта исследования с ранее найден-

ными геометрическими характеристиками поперечного сечения. В свою очередь, напряжения и деформации, полученные в результате расчета методом конечных элементов (рис. 2, б, 3, б и 4, б), будут выступать в роли критериев оценки адекватности геометрических характеристик и напряженно-деформированного состояния, найденных предложенным способом.

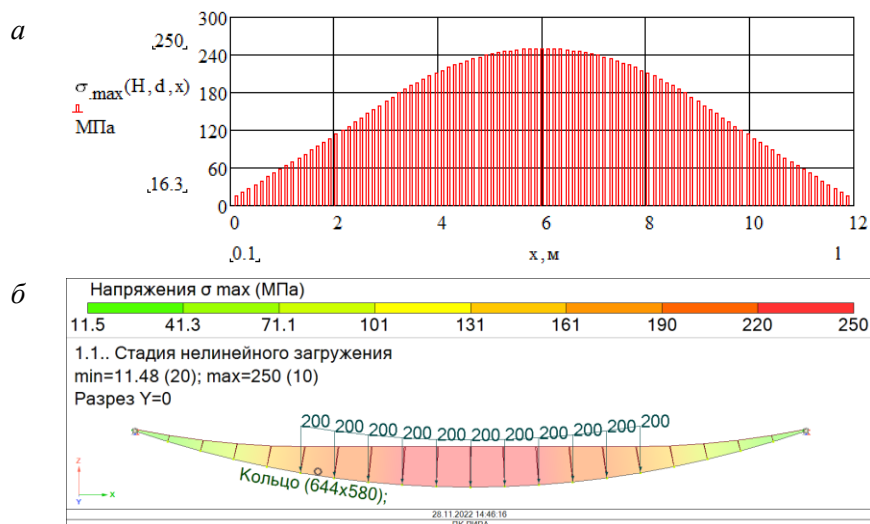


Рис. 2. Эпюра максимальных нормальных напряжений:
а – предложенная методика; б – метод конечных элементов

Fig. 2. Maximum normal stresses:
а – proposed method; б – finite element method

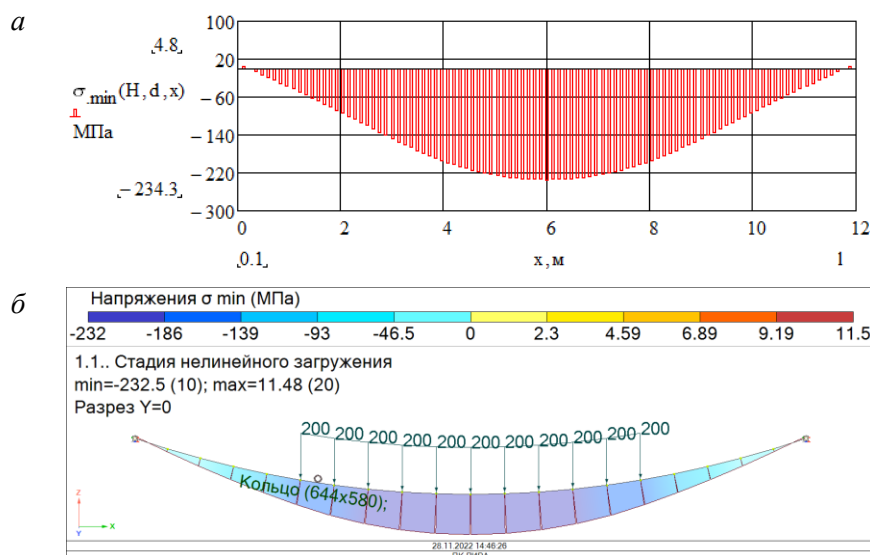


Рис. 3. Эпюра минимальных нормальных напряжений:
а – предложенная методика; б – метод конечных элементов

Fig. 3. Minimum normal stresses:
а – proposed method; б – finite element method

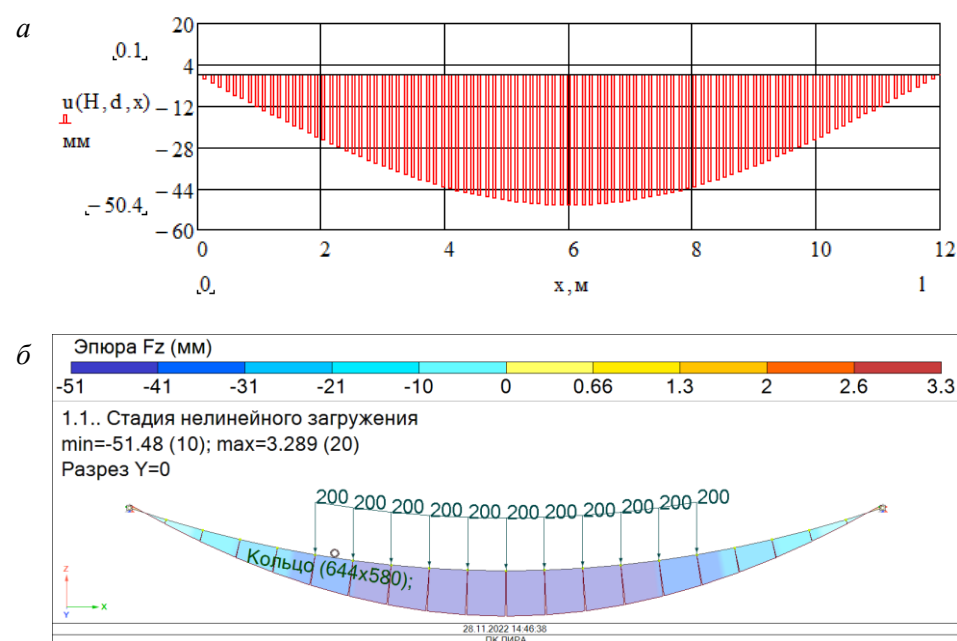


Рис. 4. Эпюра вертикальных перемещений:

а – предложенная методика; б – метод конечных элементов

Fig. 4. Vertical displacements:

а – proposed method; б – finite element method

Моделирование изгибно-жесткой нити в системе автоматизированного проектирования и расчета ЛИРА велось 20 геометрически нелинейными конечными элементами стержня сильного изгиба – тип 309. Упругоподатливые опоры задавались одноузловыми конечными элементами упругой связи по направлению глобальной оси X – тип 56. Метод приложения нагрузки осуществлялся с автоматическим выбором шага.

Принятые критерии, характеризующие адекватность геометрических характеристик поперечного сечения, полученные с помощью предложенной методики и метода конечных элементов, занесем в таблицу.

Критерии оценки результатов моделирования

Assessment criteria of modeling results

Критерий оценки	Предложенная методика	МКЭ	Расхождение значений, %
Максимальные нормальные напряжения, МПа	250	250	0
Минимальные нормальные напряжения, МПа	-234,3	-232,5	0,77
Максимальный прогиб, мм	-50,4	-51,48	2,1

Из данных таблицы следует, что расхождения в значениях критериев, полученных предложенной технологией моделирования и общепризнанным методом конечных элементов, незначительны и находятся в рамках погрешности вычислений.

Выводы

Проведенный численный эксперимент позволяет сделать вывод о том, что представленная в настоящей работе методика дает возможность получать адекватные результаты в части оптимальных геометрических характеристик определенной формы поперечного сечения изгибно-жесткой нити, обеспечивающих минимум веса проектируемого элемента исходя из заданных ограничений по прочности и жесткости.

Задача настоящего исследования по поиску оптимальных параметров сведена к задаче нелинейного математического программирования с применением энергетического критерия. Энергетическим критерием выступало условие о достижении минимума потенциальной энергии деформации рассматриваемого элемента.

Предложенная методика дает возможность решать в геометрически нелинейной постановке обратные задачи, в их числе поиск оптимальных геометрических характеристик элементов, совмещающих работу балок и гибких нитей. Также данная методика может найти применение на стадии проектирования большепролетных покрытий общественных зданий и инженерных сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Перельмутер А.В.* Обратные задачи строительной механики // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 83–101. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101. EDN: FWMJUD
2. *Тамразян А.Г., Алексейцев А.В.* Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30. EDN: WVLCDD
3. *Тарасов Д.А., Коновалов В.В., Зайцев В.Ю.* Математическое моделирование оптимизации параметров несущих элементов, выполненных из стальных канатов // Интеграл. 2012. № 6. С. 118–120. EDN: PXXREZ
4. *Tarasov D., Kononov V., Zaitsev V., Rodionov Y.* Mathematical modeling of the stress-strain state of flexible threads with regard to plastic deformations // Journal of Physics: Conference Series: 4, Tambov, 15–17 ноября 2017 г. Tambov, 2018. P. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1084/1/012008. EDN: HHMMBB
5. *Eremeev P.G., Vedyakov I.I., Zvezdov A.I.* Suspension Large Span Roofs Structures in Russia // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. V. 17. № 2. P. 34–42. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN: NBSNNA
6. *Jiang Z., Liu X., Shi K. et al.* Catenary Equation-Based Approach for Force Finding of Cable Domes // Int J Steel Struct. 2019. № 19. P. 283–292. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0117-8>
7. *Jia L., Zhang C., Jiang Y. et al.* Simplified Calculation Methods for Static Behaviors of Triple-Tower Suspension Bridges and Parametric Study // Int J Steel Struct. 2018. № 18. P. 685–698. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0028-8>
8. *Song T., Wang B., Song Y.* A Simplified Calculation Method for Multi-Tower Self-Anchored Suspension Bridges Based on Frame Structure Theory Model // Int J. Steel Struct. 2022. № 22. P. 373–388. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00581-7>

9. Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л. Задача об определении «слабого звена» в конструкции на основе критерия критических уровней энергии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 11–23. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-11-23. EDN: GBHHBG
10. Мищенко А.В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 6 (750). С. 20–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32. EDN: YRLKDI
11. Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л. Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 3. С. 306–316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. EDN: NCBVQD
12. Карамышева А.А., Языев Б.М., Чепурненко А.С., Языева С.Б. Оптимизация формы ступенчато-призматической балки при изгибе // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3 (37). С. 91. EDN: VHSBKR
13. Ступишин Л.Ю. Прогрессирующее предельное состояние конструкций на критических уровнях внутренней потенциальной энергии деформации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1324–1336. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1324-1336. EDN: FWTECK
14. Мищенко А.В. Энергетическая оптимизация структурно-неоднородной двухшарнирной рамы // Строительная механика и конструкции. 2022. № 3 (34). С. 71–81. DOI: 10.36622/VSTU.2022.34.3.005. EDN: DKNRKF
15. Перельмутер А.В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 12. С. 1559–1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566. EDN: PKYMMG
16. Аверин А.Н. Расчетные модели гибких нитей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 9 (741). С. 5–19. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19. EDN: YFKYTO
17. Коновалов В.В., Тарасов Д.А., Зайцев В.Ю., Байкин Н.В. Компьютерное моделирование определения реакций опор гибких барьеров // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 3. С. 72–79. EDN: OZFQBD
18. Семенов В.В., Уламбаяр Х. Расчет гибких стержней на продольно-поперечный изгиб // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2(25). С. 148–158. EDN: XRTQRF
19. Аверин А.Н. Малые колебания жесткой нити вблизи статического положения равновесия // Строительная механика и конструкции. 2018. № 2 (17). С. 53–66. EDN: XRCLNZ
20. Agwoko M.P., Chen Z., Liu H. Experimental and Numerical Studies on Dynamic Characteristics of Long-Span Cable-Supported Pipe Systems // Int J. Steel Struct. 2021. № 21. P. 274–298. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00438-x>
21. Liu Z., Jiang A., Shao W. et al. Artificial-Neural-Network-Based Mechanical Simulation Prediction Method for Wheel-Spoke Cable Truss Construction // Int J. Steel Struct. 2021. № 21. P. 1032–1052. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00488-9>
22. Тарасов Д.А., Митрохина Н.Ю., Маньченкова Е.В. Алгоритм моделирования напряженно-деформированного состояния изгибно-жестких нитей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 1 (41). С. 82–93. DOI: 10.21685/2227-8486-2022-1-9. EDN: GILUNU
23. Карпунин В.Г., Голубева Е.А. Компьютерное моделирование строительных конструкций зданий и сооружений // Архитектон: известия вузов. 2019. № 4 (68). С. 17. EDN: OQTWNE

REFERENCES

1. Perelmuter A.V. Inverse problems of structural mechanics. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (4): 83–101. EDN: FWMJUD (In Russian)
2. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Modern methods of optimization of structural solutions for load-bearing systems of buildings. *Vestnik MGSU*. 2020; 15 (1): 12–30. EDN: WVLC DG (In Russian)

3. Tarasov D.A., Kononov V.V., Zaitsev V.Yu. Mathematical modeling of optimization of parameters of bearing elements made of steel ropes. *Integral*. 2012 (6): 118–120. EDN: PXKREZ (In Russian)
4. Tarasov D., Kononov V., Zaitsev V., Rodionov Y. Mathematical modeling of the stress-strain state of flexible threads with regard to plastic deformations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1084/1/012008. EDN: HHMMBB
5. Ereemeev P.G., Vedyakov I.I., Zvezdov A.I. Suspension large span roofs structures in Russia. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17 (2): 34–42. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. EDN: NBSNNA
6. Jiang Z., Liu X., Shi K., et al. Catenary equation-based approach for force finding of cable domes. *International Journal of Steel Structures*. 2019; (19): 283–292. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0117-8>
7. Jia L., Zhang C., Jiang Y., et al. Simplified calculation methods for static behaviors of triple-tower suspension bridges and parametric study. *International Journal of Steel Structures*. 2018; (18): 685–698. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0028-8>
8. Song T., Wang B., Song Y. A simplified calculation method for multi-tower self-anchored suspension bridges based on frame structure theory model. *International Journal of Steel Structures*. 2022; (22): 373–388. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00581-7>
9. Stupyshin L.Yu., Moshkevich M.L. The problem of determining the "weak link" in a design based on the criterion of critical energy levels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2021; 2(746): 11–23. EDN: GBHHBG (In Russian)
10. Myshchenko A.V. Optimization of structurally inhomogeneous rod structures based on the energy criterion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2021; 6 (750): 20–32. EDN: YRLKDI (In Russian)
11. Stupyshin L.Yu., Moshkevich M.L. Solution of beam bending problems based on the variational criterion of critical energy levels. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (3): 306–316. EDN: NCBVQD (In Russian)
12. Karamysheva A.A., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Yazyeva S.B. Optimization of step-prismatic beam shape at bending. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015; 3 (37): 91. EDN: VHSBKR (In Russian)
13. Stupyshin L.Yu. Progressive limit state of structures at critical levels of internal potential energy of deformation. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (10): 1324–1336. EDN: FWTECK (In Russian)
14. Myshchenko A.V. Energy optimization of structurally inhomogeneous double-jointed frame. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktii*. 2022; 3 (34): 71–81. EDN: DKNRKF (In Russian)
15. Perelmutter A.V. Repulsion criterion of structural limit state. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (12): 1559–1566. EDN: PKYMMG (In Russian)
16. Averin A.N. Design models of flexural threads. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2020; 9 (741): 5–19. EDN: YFKYTO (In Russian)
17. Kononov V.V., Tarasov D.A., Zaitsev V.Yu., Baikin N.V. Computer simulation of flexible barrier support reaction. *Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2012; (3): 72–79. EDN: OZFQBD (In Russian)
18. Semenov V.V., Ulambayar H. Calculation of flexible rods in longitudinal-transverse bending. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2018; 8 (2 (25)): 148–158. EDN: XRTQRF (In Russian)
19. Averin A.N. Small oscillations of rigid thread near a static equilibrium position. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktii*. 2018; 2 (17): 53–66. EDN: XRCLNZ (In Russian)
20. Agwoko M.P., Chen Z., Liu H. Experimental and numerical studies on dynamic characteristics of long-span cable-supported pipe systems. *International Journal of Steel Structures*. 2021; (21): 274–298. <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00438-x>
21. Liu Z., Jiang A., Shao W., et al. Artificial-neural-network-based mechanical simulation prediction method for wheel-spoke cable truss construction. *International Journal of Steel Structures*. 2021; (21): 1032–1052. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00488-9>
22. Tarasov D.A., Mitrokhina N.Yu., Man'chenkova E.V. Algorithm for stress-strain state modeling of bending-rigid yarns. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*. 2022; 1 (41): 82–93. EDN: GILUNU (In Russian)
23. Karpunin, V.G., Golubeva E.A. Computer modeling of building structures of buildings and constructions. *Arkhiton: Izvestia vuzov*. 2019; 4 (68): 17. EDN: OQTWNE (In Russian)

Сведения об авторе

Тарасов Денис Александрович, канд. техн. наук, доцент, Пензенский государственный университет, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, den517375@ya.ru

Authors Details

Denis A. Tarasov, PhD, A/Professor, Penza State University, 40, Krasnaya Str., 440026, Penza, Russia, den517375@ya.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2023
Одобрена после рецензирования 15.06.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 15.02.2023
Approved after review 15.06.2023
Accepted for publication 16.06.2023

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 129–142.

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 (4): 129–142.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142

EDN: SCHWMT

ВЛИЯНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Александр Александрович Крутилин¹,
Татьяна Владимировна Крапчетова²,
Надежда Александровна Инькова¹,
Олеся Константиновна Пахомова¹

¹Себряковский филиал Волгоградского государственного
технического университета, г. Михайловка, Россия

²АО «Себряковцемент», г. Михайловка, Россия

Аннотация. Однородность химико-минералогического состава – один из основных факторов, влияющих на гидравлическую активность клинкера. С целью подтверждения данного фактора было проведено исследование клинкеров, полученных в один и тот же период на печах разного способа производства: печи мокрого способа Ø4,5×170 м и печи сухого способа Ø4,34×54 м.

Актуальность. Актуальность темы обусловлена повышенным интересом к факторам, влияющим на основной показатель качества портландцементного клинкера – его прочность. С внедрением сухого способа производства особое внимание привлечено к вопросу однородности химико-минералогического состава приготавливаемых сырьевых смесей.

Задачи исследования. Приготовление сырьевых смесей для дальнейшего получения клинкера мокрым и сухим способом производства. Определение химического состава смесей рентгенофлуоресцентным методом анализа. Определение минералогического состава полученных клинкеров методом порошковой дифракции. Изучение микрострук-

туры клинкеров петрографическим методом анализа. Сравнение полученных результатов и формулирование выводов.

Методы. Для изучения микроструктуры клинкеров был проведён петрографический анализ. Полированные шлифы рассматривались под металлографическим микроскопом МИМ-7 при увеличении 500× с использованием в качестве травителя дистиллированной воды и 0,1Н соляной кислоты.

Химический состав клинкера определялся рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S8 TIGER. Данные о минералогическом составе исследуемых клинкеров были получены на дифрактометре D8 ENDEAVOR.

Результаты. Структура клинкера, полученного на печах сухого способа производства, гломеробластическая. В основном минералы образуют скопления, чередующиеся друг с другом. Кристаллизация клинкера среднекристаллическая, неравномерно-зернистая. Алит и белит могут образовывать как отдельные зерна, так и сростки или скопления.

Выводы. Неоднородность химического состава сырьевых смесей непосредственно влияет на минералогический состав клинкера и его микроструктуру, что сказывается на показателях гидравлической активности.

Ключевые слова: клинкер, алит, белит, печь, сростки, клинкерообразование, рентгеновский дифрактометр, микрооднородность, петрографический анализ

Для цитирования: Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Влияние однородности химико-минералогического состава сырьевых смесей на прочностные характеристики портландцементного клинкера // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 129–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142. EDN: SCHWMT

ORIGINAL ARTICLE

THE INFLUENCE OF HOMOGENEITY OF CHEMICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION OF RAW MIXES ON STRENGTH PROPERTIES OF PORTLAND CLINKER

Aleksandr A. Krutilin¹, Tatiana V. Krapchetova²,
Nadezhda A. Inkova¹, Olesya K. Pakhomova¹

¹Sebryakovsk Branch of Volgograd State Technical University,
Mikhailovka, Russia

²АО "Sebryakovcement", Mikhailovka, Russia

Abstract. Factors affecting the clinker strength are of great interest. The implementation of the dry process attracts attention to the homogeneity of the chemical and mineralogical composition of raw mixes.

Purpose: One of the main factors affecting the clinker hydraulic activity is the homogeneity of its chemical and mineralogical compositions. The aim of this work is to study clinkers prepared by different production methods in furnaces using wet and dry processes.

Methodology: X-ray fluorescence analysis of chemical composition of mixes; X-ray powder diffraction analysis of clinker mineralogical composition; petrographic analysis of clinker microstructure;

Research findings: The clinker structure obtained in drying furnaces is glomeroblastic. Minerals mostly generate clusters alternating with each other. Clinker crystallization is medium-crystalline, unequigranular. Alite and belite can form both individual grains and aggregates.

Research findings: The chemical composition heterogeneity of raw mixes directly affects the clinker mineralogical composition of microstructure, that has a significant impact on its hydraulic activity.

Keywords: clinker, alite, belite, furnace, intergrowths, clinker formation, X-ray diffractometer, homogeneity, petrographic analysis

For citation: Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K. The influence of homogeneity of chemical and mineralogical composition of raw mixes on strength properties of Portland clinker. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 129–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142. EDN: SCHWMT

Введение

Неоднократно проводимые исследования о влиянии наличия крупнокристаллического кварца в составе сырьевых смесей, используемых для производства портландцементного клинкера, доказывают, что его присутствие приводит к снижению реакционной способности в процессе обжига, нарушению микроструктуры и, как следствие, в дальнейшем к падению показателей активности самого клинкера [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

С целью снижения такого отрицательного фактора чаще всего прибегают к интенсификации процесса клинкерообразования за счёт оптимизации состава сырьевых смесей путём ввода дополнительного компонента, способного убрать отрицательное влияние крупнокристаллического кварца, либо путём снижения тонкости сырьевой смеси, подаваемой на обжиг, с целью увеличения её реакционной способности [9, 10, 11, 12].

Однако опыт работы вращающихся печей мокрого и сухого способов производства показал, что клинкеру, полученному на печах сухого способа, даже в случае применения материалов, не содержащих крупнокристаллический кварц, а также оптимизации тонкости сырьевой смеси всё равно присуща неоднородность микроструктуры и её несовершенство [13]. Кроме того, при использовании одних и тех же сырьевых компонентов и смесей на их основе показатели активности клинкера печей мокрого способа производства могут быть выше на 4,0–5,0 МПа, чем клинкера печей сухого способа производства [14, 15].

Исследование химико-минералогического состава клинкеров, полученных на печах разного способа производства

Одним из основных факторов, влияющих на гидравлическую активность клинкера, является однородность его химико-минералогического состава [16, 17, 18]. Для подтверждения данного фактора было проведено исследование клинкеров, полученных в один и тот же период на печах разного способа производства: печи мокрого способа Ø4,5×170 м и печи сухого способа Ø4,34×54 м.

Повышенный интерес к факторам, влияющим на основной показатель качества портландцементного клинкера – его прочность, определяет актуальность настоящего исследования. Вопрос однородности химико-минералогического состава приготавливаемых сырьевых смесей, с внедрением сухого способа производства, привлекает особое внимание.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Приготовить сырьевые смеси для дальнейшего получения клинкера мокрым и сухим способом производства.

2. Определить химический состав смесей, используя рентгенофлуоресцентный метод анализа.

3. Определить минералогический состав полученных клинкеров методом порошковой дифракции.

4. Изучить микроструктуру клинкеров петрографическим методом анализа.

5. Сравнить полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

Приготовленный для обжига штабель сырьевой смеси, а также бассейн сырьевого шлама анализировались в течение четырёх суток. С периодичностью в 4 ч отбирались точечные пробы, полученные данные усреднялись за каждые сутки. Характеристика химико-минералогического состава исследуемых образцов приведена в табл. 1–4. Данные химического анализа были получены на приборе производства компании Bruker – рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 TIGER. Количественный минералогический состав был определен методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре D8 ENDEAVOR.

Таблица 1

**Химический состав сырьевой муки, подаваемой на обжиг
во вращающуюся печь сухого способа производства**

Table 1

Chemical composition of raw mix for clinker burning in rotary drying furnace

Номер пробы	Тонкость помола, %		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	N	P	KH
	Сито 009	Сито 02							
1	10,5	2,6	13,79	2,79	2,20	43,14	2,8	1,3	0,98
2	8,4	2,3	14,09	2,87	2,29	44,39	2,7	1,3	0,99
3	8,4	2,9	14,38	2,90	2,28	43,65	2,8	1,3	0,95
4	8,7	2,6	13,78	2,87	2,35	44,30	2,6	1,2	1,01

Таблица 2

**Химический состав сырьевого шлама, подаваемого на обжиг
во вращающуюся печь мокрого способа производства**

Table 2

Chemical composition of sludge for burning in rotary wet process furnace

Номер пробы	W, %	Тонкость помола, %	Растекаемость, мм	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	N	P	KH
1	42,3	2,8	42	13,71	3,35	2,70	43,77	2,3	1,2	0,97
2	42,0	2,6	42	13,72	3,25	2,78	43,82	2,3	1,2	0,98
3	42,1	3,0	43	13,73	3,25	2,77	43,99	2,3	1,2	0,98
4	43,2	3,0	44	13,73	3,29	2,67	43,85	2,3	1,2	0,98

Для проведения рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 ENDEAVOR были выбраны следующие параметры работы прибора (рис. 1) и режим съёмки (рис. 2).

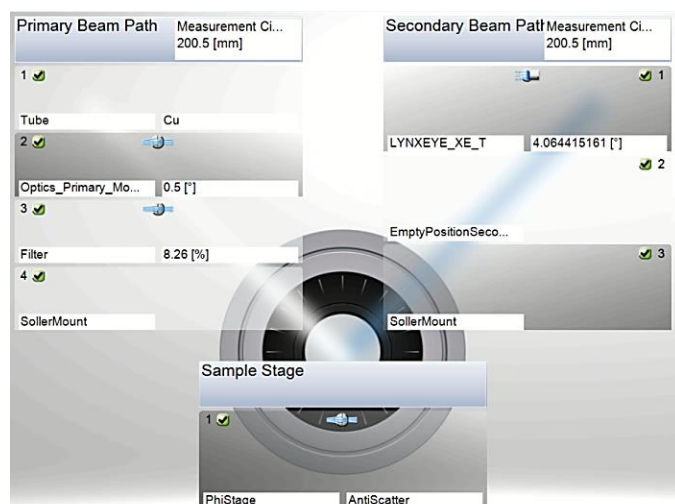


Рис. 1. Параметры работы прибора
Fig. 1. Device operating parameters

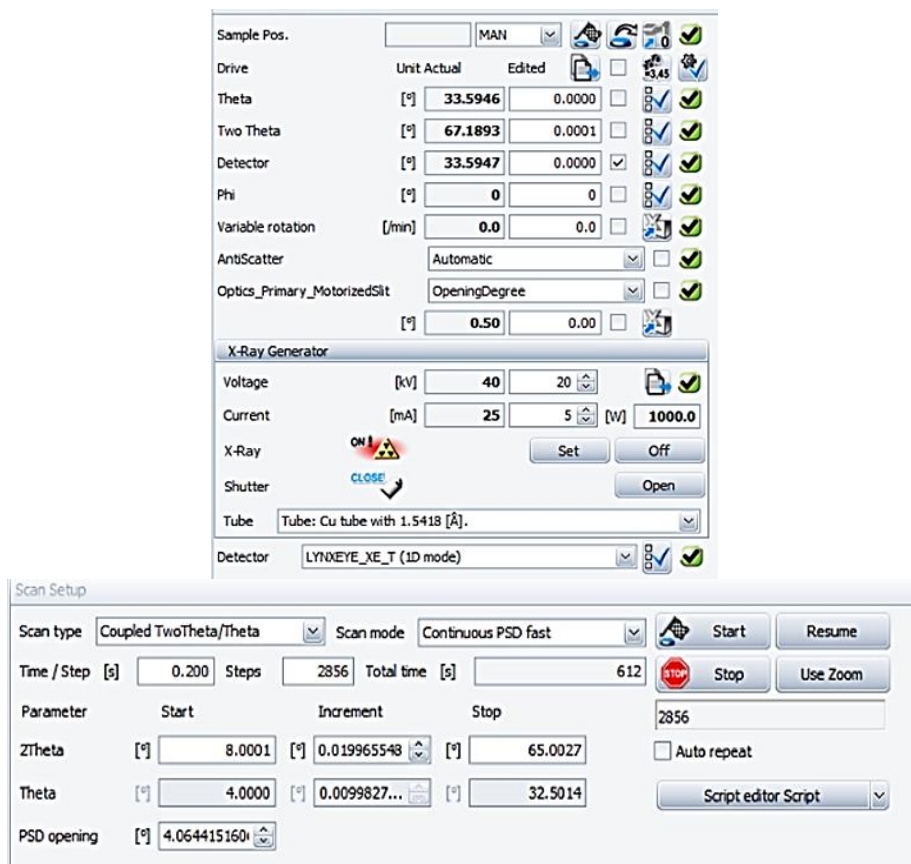
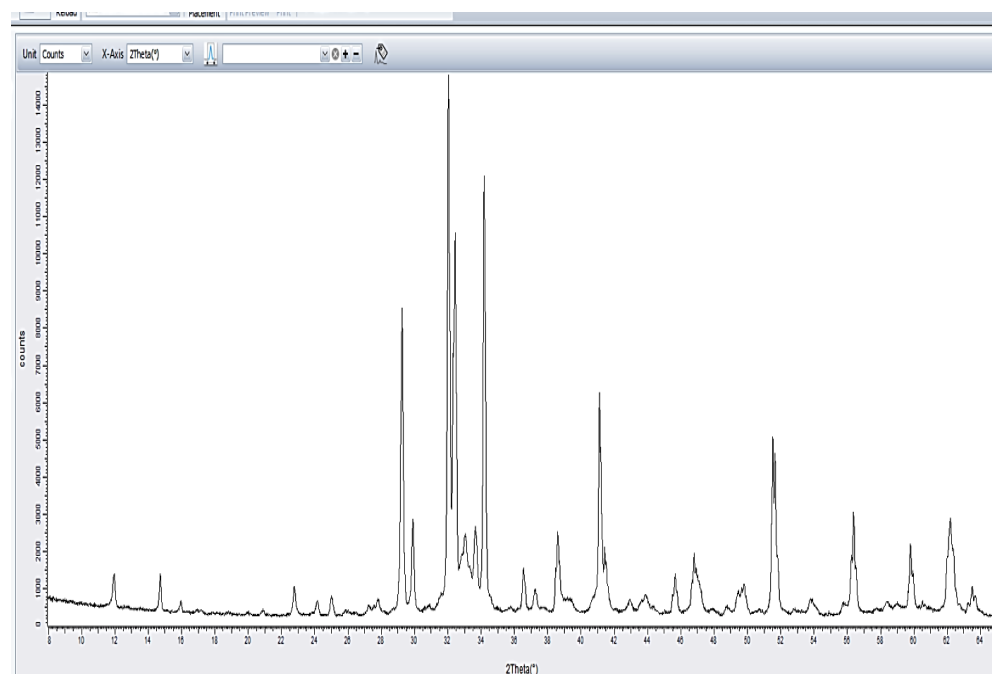


Рис. 2. Параметры режима съёмки
Fig. 2. Recording parameters

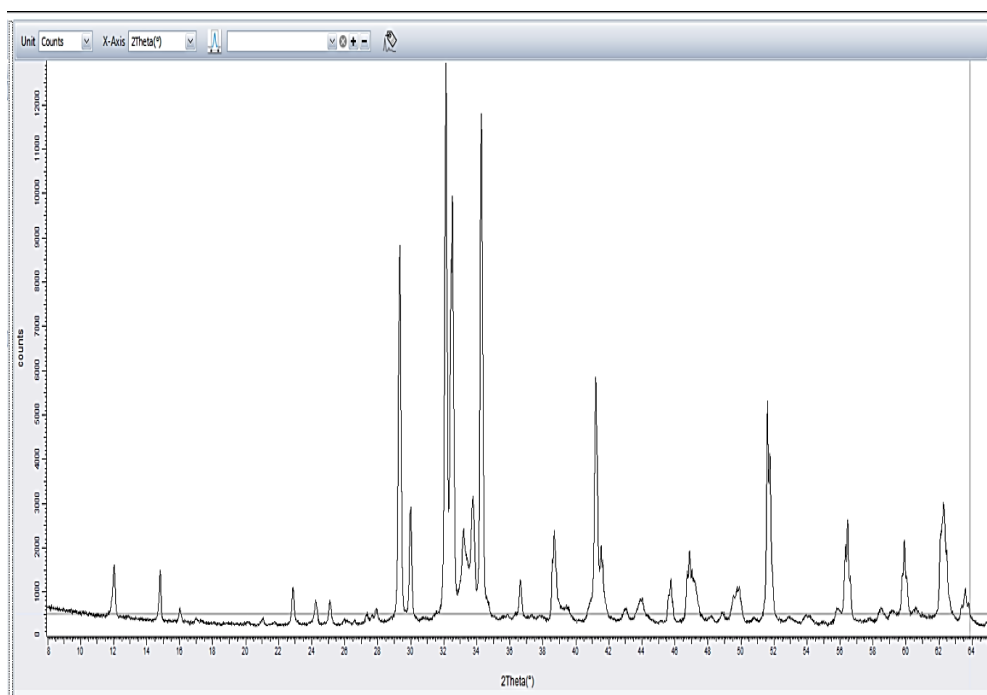
Результаты

Полученные дифрактограммы исследуемых клинкеров свидетельствуют о его составе (рис. 3, 4).



Alite_M1	19.55 %	Ferrite	9.74 %
Alite_M3	55.23 %	Lime	1.08 %
Alite_Sum	74.78 %	Portlandite	0.05 %
Fraction_M1	26.14 %	fCaO_XRD	1.12 %
Alite_CS	194.5 nm	Periclase	0.42 %
Belite_Sum	8.30 %	Quartz	0.01 %
Belite_alpha	1.49 %	Arcanite	0.00 %
Belite_alpha_H	2.90 %	Aphthitalite	0.03 %
Belite_beta	3.91 %	Langbeinite	0.06 %
Belite_gamma	0.00 %	Thenardite	0.09 %
Alum_cubic	0.31 %		
Alum_ortho	1.80 %		
Alum_mono	3.07 %		
Alum_Sum	5.18 %		

Рис. 3. Дифрактограмма клинкера, полученного в печах сухого способа производства
Fig. 3. XRD pattern of clinker obtained in drying furnace



Alite_M1	30.00 %	Ferrite	13.34 %
Alite_M3	48.26 %	Lime	0.39 %
Alite_Sum	78.25 %	Portlandite	0.10 %
Fraction_M1	38.33 %	fCaO_XRD	0.46 %
Alite_CS	205.4 nm	Periclase	0.32 %
Belite_Sum	1.96 %	Quartz	0.04 %
Belite_alpha	0.15 %	Arcanite	0.07 %
Belite_alpha_H	0.78 %	Aphthitalite	0.13 %
Belite_beta	1.03 %	Langbeinite	0.05 %
Belite_gamma	0.00 %	Thenardite	0.08 %
Alum_cubic	0.85 %		
Alum_ortho	1.79 %		
Alum_mono	2.23 %		
Alum_Sum	4.86 %		

Рис. 4. Дифрактограмма клинкера, полученного в печах мокрого способа производства

Fig. 4. XRD pattern of clinker obtained in wet process furnace

Все полученные дифрактограммы характеризовались одинаковым набором клинкерных фаз. Характеристика по количеству основных минералов приведена в табл. 3, 4.

Таблица 3

**Минералогический состав клинкера,
полученного во вращающейся печи сухого способа производства**

Table 3

Mineralogical composition of clinker obtained in rotary drying furnace

Номер пробы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO _{св}
1	71,9	10,0	6,1	9,6	0,88
2	73,9	8,2	5,8	9,9	0,91
3	70,0	12,2	5,6	10,1	0,69
4	68,6	13,6	5,2	10,5	0,73

Таблица 4

**Минералогический состав клинкера,
полученного во вращающейся печи мокрого способа производства**

Table 4

Mineralogical composition of clinker obtained in rotary wet process furnace

Номер пробы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO _{св}
1	77,0	2,7	5,5	12,1	0,60
2	76,5	3,5	4,9	13,5	0,49
3	76,4	3,3	5,1	13,4	0,48
4	77,9	2,3	5,1	13,0	0,52

Как видно из данных, приведённых выше, колебания содержания алита в клинкере печи сухого способа составляют 5,3 % против 1,5 % для клинкера печи мокрого способа производства. В то же время подаваемая на обжиг сырьевая мука также характеризуется большими колебаниями значений химического состава и модулей, чем сырьевой шлам. Её коэффициент насыщения варьирует в пределах 0,95–1,01, в то время как у шлама он остается стабильным в течение всего времени.

Для изучения микроструктуры клинкеров был проведён петрографический анализ. Полированные шлифы рассматривались под металлографическим микроскопом МИМ-7 при увеличении 500× с использованием в качестве травителя дистиллированной воды и 0,1Н соляной кислоты.

Структура клинкера, полученного на печах сухого способа производства, гломеробластическая. В основном минералы образуют скопления, чередующиеся друг с другом. Кристаллизация клинкера среднекристаллическая, неравномерно-зернистая. Алит и белит могут образовывать как отдельные зерна, так и сростки или скопления (рис. 5–7).

Алит представлен в основном кристаллами неправильной многоугольной формы (рис. 6). Белит образует скопления зерен (рис. 7). Скопления могут быть равномерно рассредоточены или образовывать крупные гнёзда вокруг поры. Разделение зёрен отсутствует и выглядит сростком. Форма зёрен белита непра-

вильная округлая, искажена. Края зерна могут быть ровными или волнистыми и зазубренными, местами рваные. Штриховка у белита отсутствует. Преобладающий размер соответствует среднекристаллической структуре и варьирует от 5 до 40 мк. Промежуточная составляющая представлена светлым и тёмным веществом в малом количестве, т. к. кристаллы в основном образуют тесные скопления и сrostки.

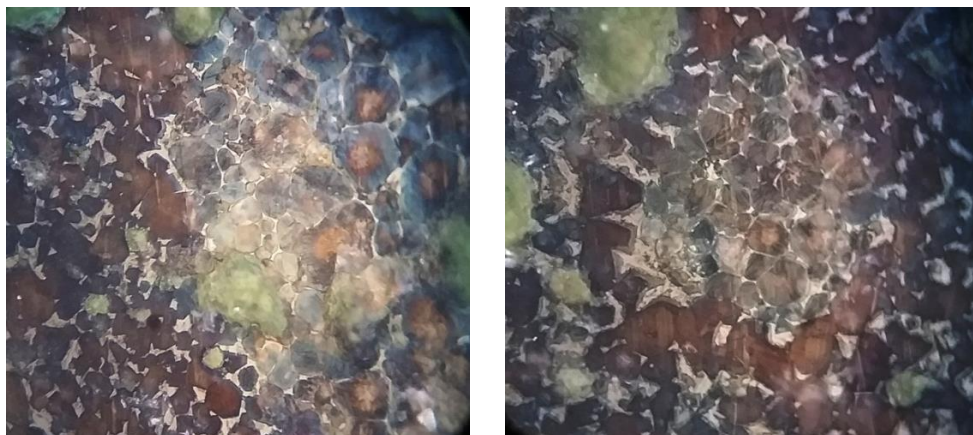


Рис. 5. Скопления алита и белита отдельными участками
Fig. 5. Alite and belite aggregations



Рис. 6. Сrostки алита
Fig. 6. Alite aggregations

Наблюдаются кристаллы свободной извести. Они образуют в основном групповые скопления в виде мелкокристаллических округлых зёрен на фоне мелкокристаллического алита или его сrostков (рис. 8).

Иная картина наблюдается в клинкере, полученном в печи мокрого способа производства (рис. 9). Структура более приближена к равномерно-зернистой. Исследуемые участки чаще представлены зёрнами алита и белита, рассеянными поодиночке, не образующими каких-либо скоплений. Размер кристаллов крупнее, их форма имеет более чёткие грани (рис. 10).



Рис. 7. Скопления зёрен белита

Fig. 7. Belite grain clusters



Рис. 8. Свободный оксид кальция на поверхности кристаллов алита в протравленном и непротравленном шлифе

Fig. 8. Free calcium oxide on alite crystal surface in etched and non-etched sections

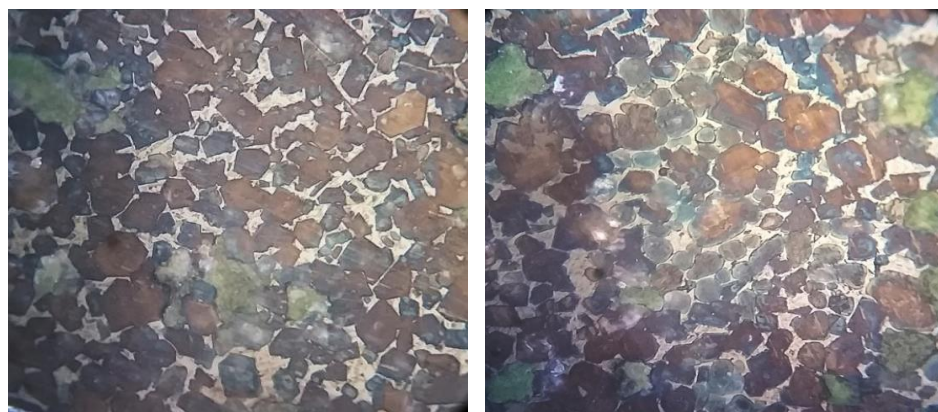


Рис. 9. Структура клинкера печи мокрого способа производства

Fig. 9. Clinker structure obtained in wet process furnace

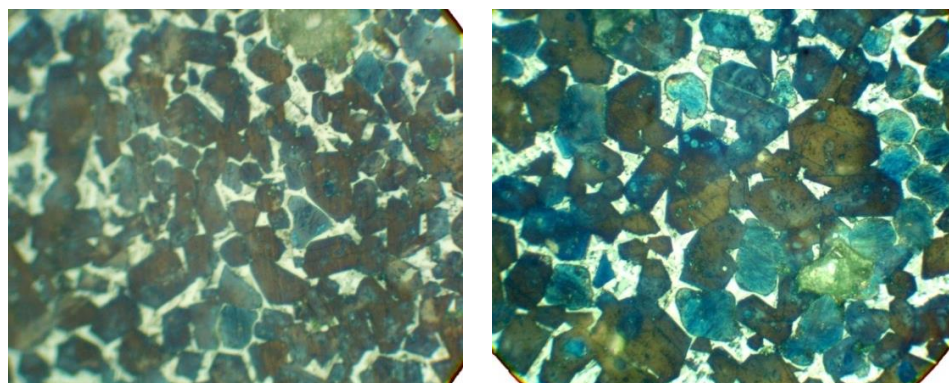


Рис. 10. Кристаллы алиита

Fig. 10. Alite crystals

Очевидно, что степень микрооднородности получаемого клинкера зависит от особенностей физико-химических процессов обжига в агрегатах различных конструкций.

При мокром способе производства в процессе сушки сырьевого шлама образуются гранулы, однородность химического состава которых определяется стабильностью состава подаваемого на обжиг шлама.

При обжиге сырьевой смеси в печах сухого способа производства прохождение порошкообразного материала через систему циклонных теплообменников обуславливает снижение однородности сырьевого потока на входе во вращающуюся часть печи. Это, по-видимому, объясняется двумя факторами: уносом из системы тонкодисперсных фракций, преимущественно карбонатного компонента, а также избирательной агрегацией глинистой составляющей, обладающей повышенной склонностью к слипанию.

Проведенные физико-механические испытания клинкера, отобранного в течение четырёх суток, показали, что наибольшей прочностью при сжатии характеризуется клинкер из печей мокрого способа производства (табл. 5).

Таблица 5

Физико-механические испытания клинкеров

Table 5

Physical and mechanical test results

Наименование пробы	Активность, МПа		Удельная поверхность, см ² /г	Тонкость помола, %	Норм. густота, %	Начало схватывания, мин
	2 сут	28 сут				
Усреднённая проба клинкера печи мокрого способа производства	19,6	56,1	3308	5,8	23,9	155
Усреднённая проба клинкера печи сухого способа производства	21,6	52,3	3288	6,9	23,8	185

Помол клинкера для физико-механических испытаний осуществлялся в шаровой лабораторной мельнице. Время помола составило 48 мин. Для проведения сравнительного анализа клинкеров пробы по каждой печи были усреднены в одну.

Заключение

В связи с расширением объема производства цемента по сухому способу задача повышения активности получаемого клинкера в печных агрегатах с циклонными теплообменными устройствами продолжает оставаться актуальной.

Для решения этой задачи необходимо прежде всего уделить особое внимание однородности химико-минералогического состава сырьевых смесей, подаваемых на обжиг. Комплексное исследование методами рентгенографической дифракции и петрографическим изучением микроструктуры позволяет выявить явное влияние этого фактора на прочностные характеристики получаемого клинкера. Для достижения высокой гидравлической активности и стабильности основных показателей качества в первую очередь необходимо наличие однородной микроструктуры и отчётливой её кристаллизации.

Таким образом, показано, что неоднородность химического состава сырьевых смесей непосредственно влияет на минералогический состав клинкера и его микроструктуру, что отражается на показателях гидравлической активности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бойкова А.И. Химия, структура и свойства клинкеров // Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее : труды Международной научно-практической конференции. Москва, 2003. Т. I. С. 107–126.
2. Калюжнов И.В., Нураков Е.С. Повышение активности клинкера на бухтарминском цементном заводе // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2015. С. 202–207.
3. Классен В.К., Михин А.С. Анализ изменения активности клинкера на ОАО «Себряков-цемент» // Фундаментальные исследования. 2006. № 2. С. 90–91.
4. Козлова В.К., Григорьев В.Г., Малова Е.Ю., Божок Е.В., Мануйлов Е.В. Сравнительные результаты определения фазового состава и микроструктуры клинкеров методами физико-химического анализа // Цемент и его применение: научно-технический и производственный журнал. 2013. № 3. С. 34–38.
5. Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Пахомова О.К., Инькова Н.А. Влияние структуры портландцементного клинкера на его гидравлическую активность // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 139–152.
6. Куляев П.В., Сизов Ю.В. Влияние гранулометрии частиц и активности цемента и добавок на механические характеристики растворов и бетонов // Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве : материалы V Международной научно-технической конференции. Тверь, 2021. С. 91–99.
7. Малова Е.Ю., Мануйлов Е.В., Козлова В.К., Маноха А.М., Вольф А.В. Определение минералогического состава клинкеров комбинированным методом анализа // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 79–83.
8. Никитина М.А., Ерыгина А.О., Тимошенко Т.И. Оптимизация состава сырьевой смеси Серебрянского цементного завода // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 4. С. 13–20.
9. Андреева Н.А. Химия цемента и вяжущих веществ. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2011. 67 с.

10. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. Москва : Высшая школа, 1989. 384 с.
11. Лугинина И.Г. Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов. Ч. 1. Белгород : Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, 2004. 239 с.
12. Шеин А.Л. Оптимизация дисперсности и химического состава сырьевой смеси при получении малоэнергоёмкого клинкера : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1994. 10 с.
13. Перескок С.А. Интенсификация обжига цементного клинкера в печах сухого и комбинированного способов производства : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2007. 19 с.
14. Бойкова А.И. Микрорентгеноспектральный анализ в химии цемента // Строительные материалы. 2007. № 3. С. 79–84.
15. Бойкова А.И. Особенности минералогии клинкерных композиций и их практическое значение // XX Всероссийское (IV Международное) совещание начальников лабораторий цементных заводов. Москва, 2002. С. 165–172.
16. Тейлор Х. Химия цемента. Москва : Мир, 1996. 560 с.
17. Усов Б.А. Химия и технология цемента. Москва, 2015. 158 с.
18. Шмитко Е.И., Крылова А.В., Шаталова В.В. Химия цемента и вяжущих веществ. Санкт-Петербург : Проспект науки, 2006. 205 с.

REFERENCES

1. Boikova A.I. Chemistry, structure and properties of clinkers. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Present and Future Science and Technology of Silicate Materials'*, Moscow, 2003. V. 1. Pp. 107–126. (In Russian)
2. Kalyuzhnov I.V., Nurakov E.S. Increase in clinker activity at the Bukhtarma Cement Plant. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists*. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2015. Pp. 202–207. (In Russian)
3. Klassen V.K., Mikhin A.S. Analysis of changes in clinker activity at AO "Sebryakovcement". *Fundamental'nye issledovaniya*. 2006; (2): 90–91. (In Russian)
4. Kozlova V.K., Grigoriev V.G., Malova E.Yu., Bozhok E.V., Manuilov E.V. Physicochemical analysis of phase composition and microstructure of clinkers. *Tsement i ego primeneniye*. 2013; (3): 34–38. (In Russian)
5. Krutinin A.A., Krapchetova T.V., Inkova N.A., Pakhomova O.K. Structure influence of Portland cement clinker on its hydraulic activity. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (4): 139–152. (In Russian)
6. Kulyaev P.V., Sizov Yu.V. Particle size and cement and additive effect on mechanical properties of mortars and concrete. In: *Proc. 5th Int. Sci. Conf. 'Innovations and Modeling in Materials Science in Construction and Land Management'*. 2021. Pp. 91–99. (In Russian)
7. Malova E.Yu., Manuilov E.V., Kozlova V.K., Manokha A.M., Wolf A.V. Combined method of analysis of clinker mineralogical composition. *Polzunovsky vestnik*. 2011; (1): 79–83. (In Russian)
8. Nikitina M.A., Erygina A.O., Timoshenko T.I. Optimization of raw mix composition at the Serebryansky Cement Plant. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2018; 1 (4): 13–20. (In Russian)
9. Andreeva N.A. Chemistry of cement and binders. Saint-Petersburg, 2011. 67 p. (In Russian)
10. Kuznetsova T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V. Physical chemistry of binding materials. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 384 p. (In Russian)
11. Luginina I.G. Chemistry and chemical technology of inorganic binding materials. Part 1. Belgorod, 2004. 239 p. (In Russian)
12. Shein A.L. Optimization of dispersion and chemical composition of raw mix in low energy-intensive clinker production. PhD Abstract. Moscow, 1994. 10 p. (In Russian)
13. Pereskok S.A. Intensification of clinker burning using dry and combined processes. PhD Abstract. Belgorod, 2007. 19 p. (In Russian)
14. Boikova A.I. X-ray microanalysis in cement chemistry. *Stroitel'nye materialy*. 2007; (3): 79–84. (In Russian)

15. Boikova A.I. Clinker composition mineralogy and practical significance. In: *Proc. 20th All-Russian Meeting of Laboratory Heads of Cement Plants*. Moscow, 2002. Pp. 165–172. (In Russian)
16. Taylor H.F.W. Cement chemistry. Moscow: Mir, 1996. 560 p. (Russian translation)
17. Usov B.A. Chemistry and technology of cement. Moscow, 2015. 158 p. (In Russian)
18. Shmitko E.I., Krylova A.V., Shatalova V.V. Chemistry of cement and binders. Saint-Petersburg: Prospect nauki, 2006. 205 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Крутилин Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, kotyga84@bk.ru

Крпачетова Татьяна Владимировна, инженер-аналитик, АО «Себряковцемент», 403342, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Индустриальная, 2, iwankra@mail.ru

Инькова Надежда Александровна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, coyote@bk.ru

Пахомова Олеся Константиновна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, pahomovaolesia@yandex.ru

Authors Details

Alexander A. Krutinin, PhD, A/Professor, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, kotyga84@bk.ru

Tatyana V. Krapchetova, Analytical Engineer, AO "Sebyakovtsement", 2, Industrial'naya Str., 403342, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, iwankra@mail.ru

Nadezhda A. Inkova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, coyote@bk.ru

Olesya K. Pakhomova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, pahomovaolesia@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 15.04.2023
Одобрена после рецензирования 01.05.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 15.04.2023
Approved after review 01.05.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 143–160.

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 (4): 143–160.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 549.642 + 544.03 + 54.057

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-143-160

EDN: DFORMM

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анатолий Васильевич Мананков^{1,2}, Валентин Михайлович Яковлев¹,
Александр Андреевич Локтюшин², Евгений Яковлевич Горюхин³

¹Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный

архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

³Томская комплексная геологоразведочная экспедиция, г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. Силикатные материалы традиционно занимают важное место в материаловедении, несмотря на непрерывно меняющиеся запросы технологии. Совершенствование материалов требует развития теории. Обширный опыт, накопленный технической и экспериментальной минералогией, не всегда согласуется с традиционными представлениями, а иногда и совсем не находит в них объяснения. Такая ситуация возникла при попытке описания аномально высоких кинетических параметров диффузии и кристаллизации в стеклах и ситаллах. Поиск решения проблемы привел к использованию наиболее общих законов естествознания – теории колебаний и волн.

В условиях неравновесной кристаллизации в искусственных силикатных системах авторами установлен механизм спинодального распада, который позднее нашел подтверждение в вулканических стеклах Земли и Луны, а также в тектитах. Развиваемая авторами модель пространственно-замкнутых динамических структур адекватно учитывает кинетику фазовых превращений, когда формирование продуктов ликвации (молекулярных кластеров) и связей между ними имеет резонансную природу.

Результаты. Создан новый класс многофункциональных материалов с необычным сочетанием физических и химических свойств. Синтетические метасиликаты уже нашли около трех десятков новых технологических применений: в медицине (хирургии, стоматологии), в производстве бытовой и аэрокосмической техники, в материаловедении (в качестве модифицирующих добавок в керамику, полиэтилен, линолеум, асфальт), в виде жаропрочной, износостойкой футеровки, золо- и шлакопроводов. Показана экономическая эффективность ситаллов на примере федерального проекта «Северный широтный ход».

Ключевые слова: промышленные отходы, спинодальный распад, изоморфизм, автоинтерференция, когерентность, резонанс, сикам, петро-шлакоситаллы, метасиликаты

Для цитирования: Мананков А.В., Яковлев В.М., Локтюшин А.А., Горюхин Е.Я. Новые возможности многофункциональных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 143–160. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-143-160. EDN: DFORMM

ORIGINAL ARTICLE

NEW OPPORTUNITIES OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS

Anatoly V. Manankov^{1,2}, Valentin M. Yakovlev¹,
Aleksandr A. Loktyushin², Evgeniy Ya. Gorukhin³

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

³Tomsk Complex Exploration Company, Tomsk, Russia

Abstract. Silicate materials traditionally occupy an important place in materials science, despite the ever-changing demands. The improvement of materials requires the development of theory. The extensive experience accumulated by technical and experimental mineralogy does not always agree with traditional ideas and, sometimes, does not find an explanation in them at all. Such a situation arises in trying to describe the anomalously high kinetic parameters of diffusion and crystallization in glass and ceramics. The search for a solution to the problem leads to the use of the most general laws of natural science, the theory of oscillations and waves. Under the conditions of nonequilibrium crystallization in artificial silicate systems, the mechanism of spinodal decomposition is found, which is later confirmed in volcanic glasses of the Earth and Moon as well as in tektites. The proposed model of spatially closed dynamic structures takes into account the kinetics of phase transformations, when the formation of segregation products (molecular clusters) and bonds between them is of a resonant nature. As a result, a new class of multifunctional materials with an unusual combination of physical and chemical properties is created. Synthetic metasilicates masters about three dozen new technological applications in medicine (surgery, dentistry), household production, and aerospace equipment, materials science (modifying additives in ceramics, polyethylene, linoleum, asphalt), heat- and wear-resistant lining, gold and slag pipelines. The economic efficiency of glass ceramics is shown on the example of the Federal Project The Northern Latitudinal Railway.

Keywords: industrial waste, spinodal decomposition, isomorphism, self-interference, coherence, resonance, petrological slag glass-ceramics, metasilicates

For citation: Manankov A.V., Yakovlev V.M., Loktyushin A.A., Gorukhin E.Ya. New opportunities of multifunctional materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 143–160. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-143-160. EDN: DFORM

Введение

Кристаллизация стекол метасиликатного состава в сильно неравновесных условиях сопровождается иногда визуально наблюдаемыми эффектами перераспределения примесных фаз. Параметры их смещения на несколько порядков превышают рассчитанные из теоретических представлений о диффузии. На основе установленного в экспериментальной минералогии факта, что связи между слагающими частицами вещества (атомами, молекулами) имеют электромагнитно-волновую природу [1, 2], создана голографическая модель вещества (ГМВ). ГМВ построена на отождествлении геометрических образов (характеристические или топологические линии поверхности тора) с физическими реалиями в виде силовых линий напряженности электромагнитного поля [3]. Ряд экспериментов показывает, что вещество для своего существования не требует никакой специфической субстанции кроме электромагнитного поля. Для суще-

ствования электромагнитного поля, как это следует из основных уравнений электродинамики, требуется только пространство. В экспериментах физики высоких энергий установлено, что элементарные частицы и античастицы порождаются электромагнитным полем, а их аннигиляция не оставляет ничего кроме поля. Таковы факты, все остальное – на уровне гипотез либо заблуждения. Что касается поля, то указания на то, что вещество является особым состоянием пространства, содержатся уже в работах Эйлера по механике сплошных сред. Уравнения Эйлера тождественны уравнениям электродинамики Максвелла. Из сопоставления теорий Эйлера и Максвелла следует, что электромагнитное поле является «деформацией» пространства.

Поле в пустоте описывается парой комплексных деформаций. В механике это растяжение и сдвиг. В электродинамике этим деформациям соответствуют электрическая и магнитная напряженность поля. Ортогональность комплексных компонент поля приводит к тому, что их скалярное (вещественное) произведение равно нулю, но векторное произведение дает вектор, имеющий смысл механического импульса, названный вектором Умова – Пойнтинга:

$$\vec{E} = \vec{H} \cdot \vec{P},$$

где $\vec{E}$ – электрическая напряженность; $\vec{H}$ – магнитная напряженность; $\vec{P}$ – механический импульс (вектор Умова – Пойнтинга) электромагнитного поля.

Импульс P введен в электродинамику при анализе баланса энергии электромагнитного поля. Поэтому поле характеризуется не парой векторов, а тройкой, что и подтверждает великий смысл тернарности, тройственной единосущности и обусловленности причин и следствий. Специфика вектора P по сравнению с векторами смещений и вращений в классических теориях упругости и электродинамики – вектор импульса не замкнут. При этом любая пара из них является причиной третьего. То есть все эти три вектора в некотором смысле эквивалентны, а детерминизм несколько отличен от классического. Эти векторы способны становиться компланарными, когда принадлежат одной или параллельным плоскостям.

Основные трудности в освоении модели ГМВ в нашей стране (в отличие от зарубежья) во многом связаны с заблуждениями в компланарности векторов. Вектор Умова – Пойнтинга, отвечающий за перенос энергии электромагнитного поля, имеет не только радиальную компоненту, которая характерна для потока энергии изменяющегося со временем источника вдали от источника (в волновой зоне). В ближней зоне вектор P трансформируется преимущественно в поток излучения, ортогональный радиальному направлению. Необходимое и достаточное условие компланарности трех векторов в пространстве основано на понятии смешанного произведения векторов [4, 5].

К любому из векторов электромагнитного поля могут быть применены дифференциальные операторы. В случае, когда значение механического импульса не равно нулю ($\text{rot} \neq 0$), имеет место пространственно локализованный электромагнитный объект со свойствами, соответствующими и элементарной частице. Замыкание контура механического импульса rot стабильной (не виртуальной) частицы осуществляется на поверхности тора, что, в соответствии с теоремой А. Ляпунова, является наиболее устойчивой конфигурацией поля.

Оно означает рождение частицы или пространственно обособленного объекта с моментом импульса. Момент импульса, как и сам импульс, – параметры (свойства) объекта с массой, которую измеряют при взвешивании.

Структуры волновых пространственно-замкнутых (локализованных) объектов в виде решеток пересекающихся силовых линий, взаимодействуя с подобными, порождают в результате интерференции их полей пространственно-замкнутые динамические структуры следующих уровней организации вещества.

В основе научных и технологических решений, представленных в настоящей работе, лежат принципы ГМВ [3]. Собственно, ГМВ является обобщением опыта экспериментальной работы сотрудников лаборатории кинетики и кристаллофизики НИ ТГУ с 1972 г. По сути, голографическая модель вещества нашла применение и для решения методологических проблем общенаучного характера, и для развития естественно-научной картины мира и природы мироздания.

В конце XX в. в материаловедении практически параллельно получили развитие формализованные статистические приемы термодинамики, квантовой химии, а также достаточно новые научные направления: неравновесной термодинамики, синергетики, макрокинетики и теории фракталов. Общим недостатком этих направлений, при несомненных достоинствах, является отсутствие достаточно наглядных образов физической картины описываемых явлений и процессов. В науке формирование как общего мировоззрения, так и специальных дисциплинарных мировоззренческих представлений всегда опиралось на наглядные образы как наиболее соответствующие реально наблюдаемому Порядку Вещей и Гармонии Мира в целом и в деталях [3].

Структурированные системы являются динамическими голограммами, устойчивость которых определяется понятиями временной и пространственной когерентности. Поскольку стабильное вещество представляется в ГМВ гармоническим волновым пространственно-замкнутым пакетом, то процессы взаимодействия и химических связей надатомных структур в конденсированных средах должны иметь резонансный характер [6]. Подтверждением верности подхода явилось совпадение реальных структур ряда кристаллов с пространственными решетками и эксперименты авторов по кинетике фазовых превращений [7, 8, 9, 10].

Поскольку области конструктивной интерференции каждого «набора» векторов в пространстве не совпадают или не вполне совпадают, то структура динамической голограммы может отвечать трем типам когерентности: электрической, магнитной и механической. Известны и элементарные возбуждения, ответственные за каждый тип когерентности – это, помимо электронов, магнотны (обменные взаимодействия) и фононы (упругие взаимодействия). Вероятно, выделить систему с «чистым» типом когерентности невозможно, но далее по мере усложнения структур появляется еще четыре смешанных типа (табл. 1).

Первые шесть типов когерентности представляют собой неорганические материалы, начиная с ионных кристаллов. Седьмой тип относится к биологическим, органоминеральным и минеральным объектам, когерентность которых основана на всех трех типах взаимодействий. В самом деле, специфика живых клеток позволяет полагать, что структурообразующим началом являются протоны и совместные решетки групп протонов. Эта специфика находит свое

отражение как в характерных размерах клеток, так и их симметрии. С другой стороны, для ГМВ реализация интерференционных решеток, образованных поверхностями высших порядков, совершенно естественна. Поэтому морфологические признаки являются проявлением не некой дефектности, а выражением самой микроструктуры минерала. Решетки, образованные поверхностями высших порядков, проявляются в морфологических признаках, весьма схожих с морфологией биологических объектов. Широко известны «растительные» корни терминов в минералогии (перисто-, листообразность, дендриты и т. п.). Очень часто почти идеальные кристаллы минералов встречаются в форме плодов и семян. Более того, отмечается для кристаллов алмазов не только их выпуклогранная форма, подобная форме семени, но и наличие волокнистых оболочек, делающих это морфологическое родство.

Таблица 1

Типы когерентности и общая классификация материалов

Table 1

Coherent types and classification of materials

№ п/п	Тип когерентности	Структурный класс материалов
1	Электронная (Э)	Ионные кристаллы
2	Магнетонная (М)	Металлы
3	Фоновая (Ф)	Стекла
4	Электронно-магнетонная (Э-М)	Полупроводники
5	Электронно-фоновая (Э-Ф)	Стеклокристаллические (ситаллы, каменное литье, керамика)
6	Магнетонно-фоновая (М-Ф)	Металлические стекла
7	Электронно-магнетонно-фоновая (Э-М-Ф)	Живые, органо-минеральные, минеральные

Сегодня традиционная аналитическая техника хорошо «различает» только электронные взаимодействия и структуры электронного типа когерентности. Нелинейность структуры иногда отслеживается по аномалиям ширины дифракционных рефлексов, но для описания реальных структур нужны методы для изучения поверхностей высших порядков.

Создание резонансно-информационной методологии в материаловедении

В природе реальные объекты, располагающиеся строго периодически по волновым принципам, встречаются повсеместно в явлениях самого несопоставимого масштаба – от космических до микроскопических. Участие в них низкоэнергетического протонирования подтверждается новыми теориями. Одна из них – электронно-протонная теория – фундаментальная основа физико-химических процессов выщелачивания оксидных минералов в гидрометаллургии, при обработке алмазов, других ювелирных минералов [11, 12, 13].

Первое представление о мире как о голограмме, подтвердившее более ранние результаты экспериментов авторов настоящей статьи, появилось в кван-

товой механике в результате фундаментального открытия XX в. – корпускулярно-волнового дуализма [3]. Оно принадлежит ученым-физикам Д. Бому и К. Прибраму, чьи идеи потрясли незыблемость рационализма [14]. Группа ученых в 1982 г. при университете в Париже стала известна благодаря открытию, которое считается наиболее значительным в XX в.: элементарные частицы, например протоны, в определенных условиях способны мгновенно сообщаться друг с другом независимо от расстояния между ними [15]. Проблема этого открытия в том, что оно нарушает постулат Эйнштейна о предельной скорости распространения взаимодействия. В дальнейшем развитием волновой идеи занимался М. Талбот и другие ученые и философы [16]. Эти выдающиеся исследования принесли заслуженное признание зарубежным ученым, хотя ещё в 1996 г. авторы настоящей статьи опубликовали результаты своих исследований в монографии [3].

Формированию голографических идей в нашей стране способствовали открытия астрофизика Н.А. Козырева в планетологии и теории времени [17]. Профессор кафедры минералогии ТПУ А.М. Кузьмин более 30 лет изучал волновые структурные проявления и в 1948 г. систематизировал результаты в докторской диссертации [18]. Доказывая волновую природу, он был очень близок к формулировке фундаментальной закономерности: ритмика в структуре кристаллов и процессы обмена в минеральных объектах и геодинамике подчиняются волновым числам установившихся колебаний.

Даже сейчас можно считать, что вопросы организации надатомных структур, важность которых известна с древних времен, в целом в материаловедении существенно отстают от устройства вещества на микроуровне. Ионно-молекулярные механизмы и электронные плотности, безусловно, являются важнейшим уровнем в познании природы вещества и конструировании нужных материалов. В отличие от атомного уровня с богатейшей теоретической базой квантовой механики и химии, надатомная организация вещества находится на стадии сбора технологических рецептов с привлечением в качестве теории туманных представлений о доменах, кластерах, мицеллах и т. п. С этой целью в школе академика В.Е. Панина занялись развитием направления мезомеханики, пытаясь на квантовых принципах «расшифровать» природу дислокаций и других дефектов твердого тела. В результате получены уравнения типа деформаций смещения и сдвига, примененные Эйлером в теории упругости и позднее Максвеллом в электромагнитной теории [19]. Известно, что сами классики подчеркивали ограниченность этих уравнений. Эти уравнения не о веществе, они способны описывать пространства со специфическими свойствами. Ограничения теории Эйлера – Максвелла, вероятно, исходят из локальной применимости евклидовой геометрии.

При электронном описании кристаллов другие виды взаимодействий (магнитные и механические), не меньшие по порядку сил, относят скорее к дефектам структуры, нежели к самой структуре. Другие виды взаимодействий – это обменные, связанные с магнитными свойствами, и колебательные моды, усиливающиеся при тепловом воздействии. Они могут образовывать собственные когерентные структуры, т. е. структуры с магнотными и фононными типами резонансных решеток. С них начался прорыв в высоких технологиях.

Примером такого прорыва стало создание квантовой вычислительной машины группой М. Лукина в Гарвардском университете. Были открыты особые фотонные связи, что позволило говорить о создании фотонной материи [20].

В природе химическая дифференциация при участии автоколебательных длиннопериодических процессов за счет протонно-гидратационного механизма фиксируется в периодических структурах разного масштаба: от ритмически расслоенных недр планет до локальных мономинеральных образований в виде зональных минералов, конкреций, жеод и т. п. Их масштабы, благодаря низкоэнергетической активации процессов, значительно превышают те, что следуют из традиционных термодинамических и основанных на них геохимических представлений.

В процессах фазовых превращений и обмена важнейшая роль принадлежит диффузионным и инфильтрационным потокам [21]. У каждого из них существуют замкнутые векторные поля, они способны или стабилизировать исходный поток, или, напротив, сделать его нелинейным. Последний вариант возникает при нестационарных условиях, сопровождающихся возникновением вихревых потоков.

В крупных масштабах имеет смысл рассматривать полевые структуры электромагнитной и гравитационно-кинетической природы. При электронной-тральности вещественных потоков векторное поле представляет собой поле момента импульса, которое при значительных интенсивностях потоков сопровождается аномальными скоростями в процессах фазовых переходов. Процессы квазистационарного развития минералов в природе и технических системах, как правило, имеют гидратационный и протонно-гидратационный механизмы. Эти два механизма неразрывно связаны и, порождая друг друга по волновому принципу, вызывают ритмическую сменяемость этапов высокотемпературного протонирования и гидратации [3].

Такая ритмика проявляется в периодическом изменении кинетических параметров как по пространству кристаллизатора технологической установки, так и во времени для локальных его участков. В итоге за счет циклической смены протонно-гидратных условий формируются кристаллические агрегаты. Низкая энергетика и высокая скорость процесса по сравнению с классической химической ионной сборкой объясняются по-разному. В основном ссылаются на роль строительных надатомных наноблоков – прима-тел К.И. Чепижного [22]. Авторы экспериментально показали ведущую роль в этом процессе механизма спинодального распада и супердиффузии [23, 24], что позволило открыть целый класс материалов [25], получить около 40 патентов на составы и способы синтеза. Эти материалы завоевали две серебряные и две бронзовые медали на ВДНХ СССР, а также медали международного уровня. В настоящее время механизм спинодального распада из гипотезы превратился в отдельный раздел петрогенезиса магм и силикатных расплавов [26].

Реализация волновой концепции в создании ситаллов

Ситаллы – конструкционные многофункциональные синтетические материалы. Они появились в середине XX в. при развитии ракетной техники. Сегодня известны ситаллы с широким спектром свойств (полупроводниковые,

износостойкие, кислотостойкие, жаропрочные, а также специальные – поглощающие тепловые нейтроны и т. п.). Ситаллы становятся инновационными материалами в различных сферах и отраслях экономики. Наши полупроводниковые ситаллы работают в бетатронах с конца 1970-х гг. в качестве футеровки в скрубберах ТЭЦ, на Байконуре, в «Буране» и т. п. [26].

Силикатные расплавы представляют собой ионно-полимерные жидкости микрогетерогенного строения, в которых степень полимеризации полианионов определяется концентрацией катионов-модификаторов. Для ситаллов метасиликатного состава в системе $\text{CaO-MgO-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ исходная шихта (природное сырье, промышленные отходы добычи, переработки минерального или энергетического сырья) по результатам химических анализов доводится с помощью корректирующих добавок до метасиликатного. По общей формуле цепочечных силикатов $\text{M}_2\text{M}_1(\text{R}_2\text{O}_6)$ достигают равенства мольных долей в катионных подрешетках M_1 и M_2 и кремнекислородных полиэдрах (Si_2O_6). Это происходит при значении модуля кислотности-основности $\text{Mk} = 1$ [27]. Контроль осуществляется расчетом составов шихт на кристаллохимические формулы (на 6 атомов кислорода) с учетом пределов изоморфных замещений в трех подрешетках моноклинных пироксенов. Полученные мономинеральные метасиликаты с обширным полем изоморфных замещений являются наиболее перспективными, поскольку в их структуре возникают когерентные наноструктуры, которые энергетически связаны друг с другом гармоничными отношениями [28, 29]. В табл. 2 представлены кристаллохимические формулы ситаллов, созданных на основе промышленных отходов золоторудных месторождений Полярного Урала и базитов Томского района.

Таблица 2

Кристаллохимические формулы петроситаллов

Table 2

Crystal-chemical formulas of petrurgical glass-ceramics

№ пробы	Подрешетки в формуле пироксенов		
	M_2	M_1	R
1	$(\text{Ca}_{0,86}\cdot\text{Na}_{0,13}\cdot\text{K}_{0,01})$	$(\text{Ca}_{0,06}\cdot\text{Mg}_{0,29}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,18}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,13}\cdot\text{Al}_{0,34})$	$(\text{Si}_{1,65}\cdot\text{Ti}_{0,01}\cdot\text{Al}_{0,34})\text{O}_6$
2	$(\text{Ca}_{0,9}\cdot\text{Na}_{0,09}\cdot\text{K}_{0,01})$	$(\text{Mg}_{0,4}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,22}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,22}\cdot\text{Al}_{0,20})$	$(\text{Si}_{1,57}\cdot\text{Ti}_{0,02}\cdot\text{Al}_{0,41})\text{O}_6$
3	$(\text{Ca}_{0,83}\cdot\text{Na}_{0,08}\cdot\text{K}_{0,09})$	$(\text{Ca}_{0,4}\cdot\text{Mg}_{0,13}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,13}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,08}\cdot\text{Al}_{0,25})$	$(\text{Si}_{1,81}\cdot\text{Ti}_{0,02}\cdot\text{Al}_{0,16})\text{O}_6$
4	$(\text{Ca}_{0,74}\cdot\text{Na}_{0,18}\cdot\text{K}_{0,09})$	$(\text{Ca}_{0,29}\cdot\text{Mg}_{0,16}\cdot\text{Fe}^{+2}_{0,11}\cdot\text{Fe}^{+3}_{0,07}\cdot\text{Al}_{0,38})$	$(\text{Si}_{1,79}\cdot\text{Ti}_{0,02}\cdot\text{Al}_{0,18}\cdot\text{P}_{0,01})\text{O}_6$

По составу шихты рассчитывается весовое количество требуемого основного сырья и подшихтовок. Затем осуществляется дробление и смешивание. Составы (табл. 2) плавилась до гомогенного состояния при 1360–1400 °С, время плавления – 1,5–2,0 ч. После закалывания и отжига гомогенные стекла подвергаются кинетическим исследованиям с целью изучения механизмов фазовых превращений и определения технологических параметров ситаллизации с помощью различных физико-химических аналитических методов. Для определения температурных интервалов зародышеобразования и роста кристаллов стекла исследованы методом ДТА (прибор NETZSCH STA 409 PC/PG)

в интервале 20–1100 °С. Термограммы с вычисленными эндоэффектами (T_1) и экзоэффектами (T_2) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты ДТА стекол на основе базитов Полярного Урала

Table 3

DTA results of Polar Urals basite-based glass

№ пробы	T_1 , °С	E_1 , мВт/мг	T_2 , °С	E_2 , мВт/мг
1	723	0,391	905	0,494
2	711	0,423	897	0,812
3	742	0,321	951	0,591
4	727	0,360	964	0,686

Примечание. T_1 – температура образования зародышей основной фазы; T_2 – температура роста кристаллов; E_1 – энергия активации зародышеобразования; E_2 – энергия роста кристаллов. Номер пробы 1–4 соответствует номерам в табл. 2.

Динамические или квазистационарные управляющие решетки в процессе получения того или иного материала можно сформировать с помощью внешних воздействий еще на стадии стеклообразного состояния. К воздействиям такого рода относятся не только термомеханические технологические приемы, но и разного рода высокочастотные звуковые и электромагнитные возбуждения. Очевидно, что параметры при этом образующихся решеток будут зависеть от используемых частот, внешних резонаторов и, естественно, от свойств самого материала и резонансных свойств образца, т. е. от его формы и размеров.

В формировании структуры вещества участвуют также и низкочастотные моды объемных колебаний, которые также зависят не только от свойств материала, но и от геометрии и размеров получаемого изделия или образца. Собственные геометрические моды колебаний модулируют параметры решеток вещества и тем самым влияют на его свойства. Связь геометрии образца и его структуры иллюстрируется приведенной ниже фотографией стеклянного шара (рис. 1). Распределение газовых пузырей в нем совершенно не случайно соответствует узлам некоторой объемной решетки проектируемого метасиликата.

Подтверждением возможности динамических надатомных построек с неевклидовой метрикой являются фуллерены, которые соответствуют реальным кристаллам сферического пространства Римана [3]. Особое значение имеют решетки, образуемые «сильными» ионами, исчезающе малые концентрации которых оказывают порой решающее влияние на свойства материалов. Это обстоятельство позволяет совершенно по-новому оценивать роль кислотно-основных взаимодействий в природных процессах и в технологиях. Ранее совершенно необъяснимые концентрические структуры с размерами 2,5–10,5 мкм из мицелл нанометрового диапазона кристаллов магнетита в кристаллизующихся метасиликатных стеклах теперь можно интерпретировать как структурно управляющее воздействие протонов и их решеток. На электронной микрофотографии закаленного стекла метасиликатного состава отчетливо просматриваются светлые кольца структурных неоднородностей, индуцированных протонами

(рис. 2). При нагреве системы в кольце как резонаторе для теплового излучения возникают стоячие волны, которые формируют частоты надатомного упорядочения. Целый ряд ионов, как элементарных, так и молекулярных, обладает весьма большим (порядка 1 мкм) радиусом обменных взаимодействий. Благодаря этому они также образуют собственные решетки, влияние которых на процессы структурирования и свойства матрицы является определяющим.

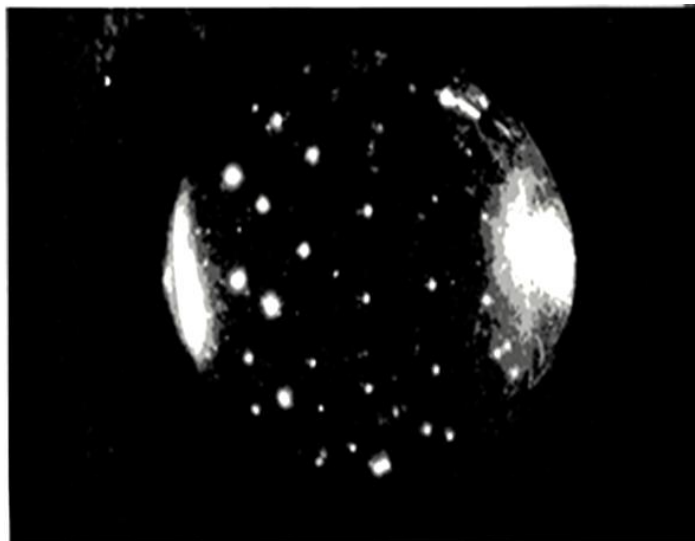


Рис. 1. Распределение газовых пузырей в стеклянном шаре метасиликатного состава по узлам геометрически правильной объемной решетки. $\frac{1}{4}$ натуральной величины

Fig. 1. Distribution of gas bubbles in a metasilicate glass ball in sites of a geometrically regular crystal lattice, $\frac{1}{4}$ of natural size



Рис. 2. Кольцевые структуры электронной плотности, индуцированные протонами, на начальной стадии кристаллизации стекла. 10 000 $\times$

Fig. 2. Electron-density annular structures induced by protons at the initial stage of glass crystallization. Magnification: 10 000 $\times$

С точки зрения практического применения наиболее известным из этих ионов является хром, используемый как катализатор зародышеобразования при получении ситаллов. На фотографии (рис. 3) кристаллизация хромшпинели в стекле демонстрирует формирование строго упорядоченных фрактальных структур в стекле. Соотношения размеров критических тел здесь связаны отношениями простых чисел.

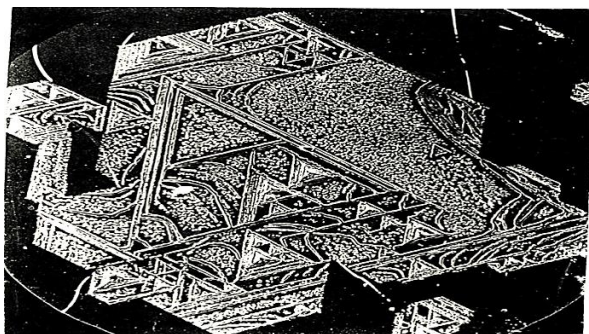


Рис. 3. Заполнение решетки критических тел хромшпинели в стекле. Размеры критических тел связаны отношениями простых чисел ($1/2$, $1/4$, $3/4$ и т. д.). $10\,000\times$

Fig. 3. Chrome spinel bodies in glass lattice. The body size: $1/2$, $1/4$, $3/4$, etc. Magnification: $10\,000\times$

Результаты лабораторных экспериментальных исследований позволили установить, что системы метасиликатного состава являются высококогерентными, они проявляют свою уникальность через механизм и кинетику фазовых превращений (рис. 4). Сочетание этих факторов послужило стимулом для дальнейших исследований в разработке новых конструкционных многофункциональных материалов.

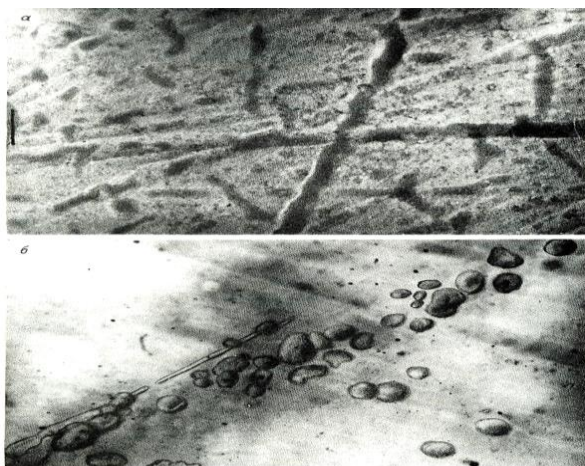


Рис. 4. Субмикроструктура спинодального распада в нагреваемом исходном стекле после его закалки. $10\,000\times$

Fig. 4. Submicrostructure of spinodal decomposition in heated initial glass after quenching. Magnification: $10\,000\times$

Стеклокристаллические материалы после кристаллизации по результатам РФА соответствуют составам твердых растворов в системе «моноклинные пироксены – волластонит», отличающейся широким гетерогенным изоморфизмом (рис. 5), а также монофазным крайним составом (диопсид и β -волластонит).

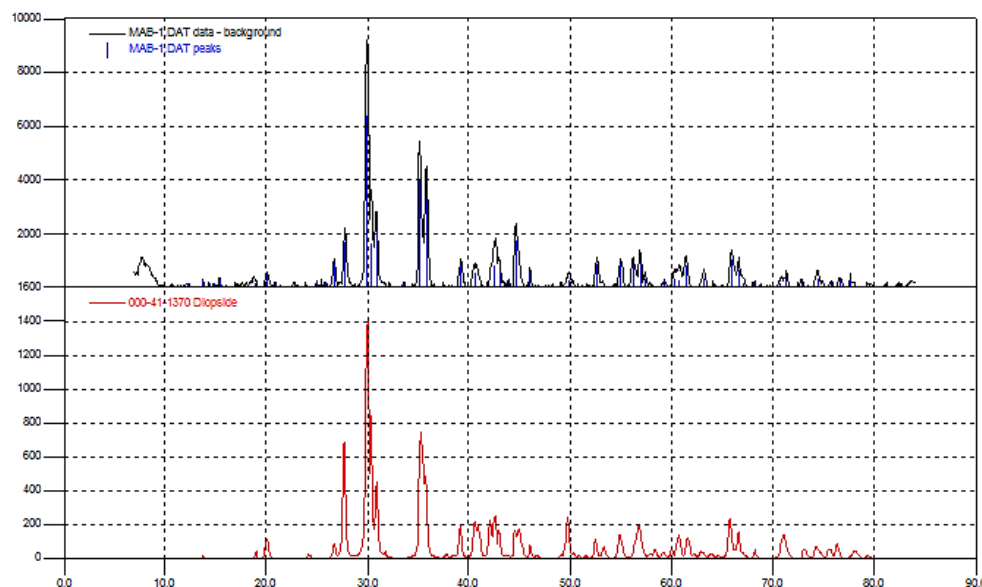


Рис. 5. Рентгенограмма петроситалла класса ККС, образец № 1 (вверху) и эталонный диопсид № 000-41-1370 (внизу) из ACTM (Crystallographica Search-Match)

Fig. 5. XRD patterns of petrological glass-ceramics, sample 1 (blue) and reference diopside N 000-41-1370 (red). (Crystallographica Search-Match)

Основные свойства нового материала из минерального сырья Полярного Урала в сравнении с традиционными материалами представлены в табл. 4. Табличные данные подтверждают, что применение петроситаллов класса «си-кам» при строительстве транспортной и промышленной инфраструктуры может оказаться наиболее эффективным. Созданные материалы [26, 27, 28] нужны для строительства дорожных плит, трубопроводов и автодорог на винтовых сваях, взлетно-посадочных полос полярных аэродромов и военных авиабаз в Арктике, грузовых и нефтегазовых морских терминалов, портов и пирсов на арктическом побережье, искусственных островов и кустов бурения на болотах, озерах и мелководном шельфе с заморозкой основания промплощадок криосваями, подводных кессонных буровых станций (типа «подводный колокол»), смонтированных из сталеситалловых сферических фуллеровых тубингов, и т. п. Эти достоинства материала могут найти широкое применение в России и в других странах. Освоение недр Заполярья и шельфовых зон морей Восточной Арктики – одно из современных перспективных направлений. Япония в течение последних лет вложила более 50 млн иен в создание промышленной технологии и проводит промышленные испытания

по добыче природного газа из газогидратов [30]. Огромные перспективы и у дефицитного материала мономинерального волластонитового состава [26].

Таблица 4

**Свойства петроситаллов класса «сикам»
и других конструкционных материалов**

Table 4

Properties of petrurgical glass-ceramics and other constructional materials

Показатель (свойство)	Петроситаллы класса «сикам»	Каменное литье*	Бетон*	Чугун*
Коэффициент линейного расширения (КТР) $10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	65–114	48–100	100	100
Температура начала размяг- чения, $^{\circ}\text{C}$	950–1100	900–1050	–	–
Сопротивление истиранию, г/см^2	0,015–0,04	0,02–0,08	–	–
Предел прочности, МПа: при статическом изгибе при сжатии	100–188 707–909	47–80 250–500	– 5–60	280 800–1000
Химическая стойкость, %: H_2SO_4 NaOH	94,6–99,9 98,0–99,0	99,8 98,5	– –	– –
Стоимость 1 куб. м материа- лов в рублях	9000 на заводе петроситаллов	30 000	18 000–24 000 в ЯНАО	112 000

* По данным [24].

Экономические аспекты концепции

Из сравнительного анализа результатов опытно-заводских испытаний следует, что ситаллы нового класса по прочности на изгиб и сжатие сравнимы с чугуном, при этом легче в три раза. Они практически не подвержены коррозии и, что очень важно, их себестоимость в 12 раз ниже. В случае размещения завода по производству этих материалов из отвальных отходов золоторудных месторождений Полярного Урала в п. Харп ЯНАО общая стоимость материала снижается кратно. Стоимость природного газа в этом регионе составляет 3 тыс. руб./тыс. м^3 . Производство одного кубометра петроситалла на тепловые технологические нужды требует около 400 м^3 . Реализация результатов может оказать позитивное влияние на основные показатели проектирования и строительства Северного широтного хода (неоднократно откладываемого) и деятельность нефтегазодобывающих предприятий. Рост экономической привлекательности может быть осуществлен за счет:

1. Увеличения дохода от роста реализации продукции:
 - за счет использования местного природного сырья;
 - ускорения темпов строительства;

– экономии газа, расходуемого на собственные нужды, и снижения его потерь.

2. Снижения материальных и энергетических затрат:

– за счет использования нового оборудования, новых технологий и технологических процессов;

– инноваций, направленных на снижение расхода материальных ресурсов;

– использования импортозамещающих материалов;

– замены используемых в производстве материалов, сырья или полуфабрикатов более дешевыми;

– оптимизации графиков проведения и методов производства капитального и текущего ремонта;

– уменьшения затрат на капитальный и текущий ремонт объектов инфраструктуры;

– повышения ремонтпригодности оборудования.

3. Сокращения затрат живого труда:

– за счет использования нового оборудования, новых технологических процессов.

Заключение

В развитие идей В.И. Вернадского о неевклидовом характере геометрии в природе создана концепция интегрированного понимания структур минерального вещества на основе ГМВ [32]. Она постулирует электромагнитную природу вещества и представляет минералы как пространственно-замкнутые динамические структуры электромагнитного поля, образующиеся в результате интерференции.

Структурный порядок природных и искусственных минералов (систем) определяется когерентностью взаимодействий, ее пространственными и временными параметрами. По характеру взаимодействий следует выделить три ее типа: электронную, магнитную и фононную. Очевидно, что в чистом виде трудно выделить примеры вещества, где реализуется лишь один из трех типов когерентности. В целом, с учетом промежуточных, вернее, комплексных классов материалов установлено семь типов когерентности среды, начиная с ионных структур и заканчивая живыми организмами.

Общим выводом является то, что связанные среды всегда обладают структурным, в общем случае динамически-ритмическим резонансным порядком, выявление которого требует высокого экспериментального искусства, начало которому закладывается сегодня.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена ведущая роль механизма спиnodального распада при формировании нового класса структур. По фазовому составу они соответствуют смешанному электронно-фононному типу когерентности. Наличие высокоэластических свойств у стекол (и полимеров) выше температуры стеклования связано с нарушением условий фононной когерентности и возрастанием роли виртуальной электронной когерентности субатомных структур, что приводит к уменьшению на порядок времени кристаллизации [33, 34, 35].

Стеклокристаллические материалы нового класса способствуют развитию наиболее комплексного интегративного направления в теоретическом материаловедении и, несомненно, повышают конкурентность среди современных конструкционных и строительных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мананков А.В. О механизме ликвации в силикатных системах // Дан СССР. 1979. Т. 246. № 4. С. 942–946.
2. Мананков А.В., Шарапов В.Н. Кинетика фазовых переходов в базитовых расплавах и магмах. Новосибирск : Наука, 1985. 199 с.
3. Локтюшин А.А., Мананков А.В. Пространственно-замкнутые динамические структуры. Томск : Изд-во ТГУ, 1996. 121 с.
4. Терлецкий Я.П. Электродинамика. Москва : Высшая школа, 1990. 129 с.
5. Мастерова М.А., Янц Ю.Г. Вектор Умова – Пойнтинга дипольного электрического и дипольного магнитного моментов. URL: <http://www.vestnik.adygnat.ru>
6. Мананков А.В. К теории формирования и прогноза месторождений полезных ископаемых // Геосферные исследования. 2019. № 4. С. 83–94.
7. Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Харитонова Н.В. Кристаллохимические основы расчета мономинеральности ситаллов // Неорганические материалы. 2018. Т. 54. № 9. С. 984–992.
8. Мананков А.В., Гасанова Э.Р. Ситаллы из местного сырья для производства инновационных инфраструктур с высокой технико-экономической эффективностью в экстремальных условиях Крайнего Севера // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 11. С. 87–96.
9. Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Быкова В.В. Физико-химические и технологические аспекты разработки ситаллов нового класса // Вестник Воронежского ГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 211–222.
10. Manankov A.V. Structural Organization of Innovative Petrositalls from the Local Natural Raw Materials of the Polar Urals // Insights in Mining Science and Technology. 2020. V. 2. № 1. P. 153–161. DOI: 10.19080/IMT.2020.02.555577.
11. Киприянов Н.А., Горичев Н.Г. Электронно-протонная теория – фундаментальная основа физико-химического процесса выщелачивания оксидных минералов в гидрометаллургии // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2006. № 1 (12). С. 101–109.
12. Кондратьев Б.К., Турчин В.И. Комбинированный источник ионов. ПТЭ. 3. 1994. С. 106–111.
13. Патент № 2211760 Российская Федерация, МПК B28D 5/00 (2006.01), B44C 1/22 (2006.01), C30B 31/00 (2006.01), C30B 33/00 (2006.01). Устройство для обработки алмазов. № 2001114961/03 : заявл. 31.05.2001 : опубл. 10.09.2003 / Турчин В.И., Радько В.Е.
14. Shelli R. Jove. The Pribram-Bohm hypothesis a topology of consciousness II Cosmos and History // The Journal of Natural and Social Philosophy. 2016. V. 12. № 2. P. 114–136.
15. Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental Realization of Einsteib-Podolsky-Rosen-Bohm Gedanken experiment – A New Violation of Bell Inequalities // Physical Review Letters. 1982. V. 49. № 2. P. 91–94. PRL Bell ADR.
16. Тэлбот М. Голографическая Вселенная : перев. с англ. Москва : ИД «София», 2004. 368 с.
17. Козырев Н.А. Причинная или несимметричная механика в линейном приближении. Пулково, 1958. 41 с.
18. Кузьмин А.М. Периодическо-ритмические явления в минералогии и геологии. Томск : Изд-во STT, 2019. 336 с.
19. Панин В.Е., Гринзев Ю.В., Данилов В.И., Зуев Л.В. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск : Наука, 1990. 254 с.
20. Попсулин С. Русский ученый из Гарварда осуществил прорыв в пространстве квантового компьютера // Издание о высоких технологиях. 2012. 6 июля.
21. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. Москва : Наука, 1982. 104 с.
22. Чепижный К.И. Новое в минералогии (теория минералогии). Ленинград : Наука, 1988. 146 с.
23. Мананков А.В. Физико-химические основы наноструктурной минералогии в получении современных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 120–136.

24. Manankov A.V., Vladimirov Y.M., Strakhov B.S. Mechanism for structure formation and non-equilibrium glass crystallization model (a review) // *Glass and ceramic*. 2015. № 1 (January) P. 3–10. DOI: 10.1007/s10717-015-9710-x.
25. Свидетельство № 92355 на товарный знак «СИКАМ» – новый 19 класс камней – искусственные, строительные и конструкционные строительные материалы неметаллические : приоритет 07.02.1990.
26. Мананков А.В., Горюхин Е.Я., Локтюшин А.А. Волластонитовые, пироксеновые и другие материалы из промышленных отходов и недефицитного природного сырья. Томск : Изд-во ТГУ, 2002. 168 с.
27. Патент № 2687014 Российская Федерация, МПК C03B 1/00 (2006.01) Способ приготовления метасиликатной ситалловой шихты : № 2018116526 заявл. 03.05.2018 : опубл. 06.05.2019 / Мананков А.В., Владимиров В.М., Гасанова Э.Р. 10 с.
28. Loktyushin A.A., Manankov A.V. Mineral structure in holographic model of substance // Структура и эволюция минерального мира. Сыктывкар, 1997. С. 35–37.
29. Manankov A.V., Vladimirov V.M. On the mechanism and thermodynamic modeling of metasilicate glass ceramics crystallization // *Glass and ceramic*. 2016. № 6 (June). P. 3–7. DOI: 10.1007/s10717-016-9856-1.
30. Шубина Ю.С., Страхов Б.С., Мананков А.В. Геодинамика арктического шельфа и эманация метана из газогидратов // Материалы IX Всероссийской научной конференции с международным участием им. проф. М.К. Коровина. Томск : ТПУ, 2016. С. 10–19.
31. Павлушкин Н.М. Основы технологии ситаллов. Москва : Стройиздат, 1979. 340 с.
32. Вернадский Б.И. Научная мысль как планетное явление. Москва : Наука, 1991. 271 с.
33. Авторское свидетельство № 1737965. Способ получения пористого остеклованного блока : заявл. 14.08.1989 : опубл. 15.01.1993 / Мананков А.В., Локтюшин А.А. Бюл. № 13.
34. Патент № 2525076 Российская Федерация, МПК C03B 19/08 (2006.01), C03C 11/00 (2006.01). Способ и устройство для изготовления пористого остеклованного блока : № 2013127553/03 : заявл. 17.06.2013 : опубл. 10.08.2014 / Мананков А.В., Карауш С.А. 17 с.
35. Патент № 2582152 Российская Федерация, МПК C03B 19/08 (2006.01). Способ изготовления пористой стеклокерамики (варианты) : № 2015115361/03 : заявл. 23.04.2015 : опубл. 20.04.2016 / Мананков А.В. 10 с.

REFERENCES

1. Manankov A.V. Segregation mechanism in silicate systems. *DAN SSSR*. 1979; 246 (4): 942–946. (In Russian)
2. Manankov A.V., Sharapov V.N. Kinetics of phase transitions in basic melts and magmas. *Novosibirsk: Nauka*. 1985. 199 p. (In Russian)
3. Loktyushin A.A., Manankov A.V. Spatially closed dynamic structures. Tomsk: TSU, 1996. 121 p. (In Russian)
4. Terletskiy Ya.P. *Elektrodinamika*. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 129 p. (In Russian)
5. Masterova M.A., Yantz Yu.G. The Umov-Poynting vector of dipole electric and dipole magnetic moments. Available: www.vestnik.adygnat.ru (In Russian)
6. Manankov A.V. The theory of formation and forecast of mineral deposits. *Geosfemye issledovaniya*. 2019; (4): 83–94. (In Russian)
7. Manankov A.V., Gasanova E.R., Kharitnova N.V. Crystal-chemical bases for calculation of glass-ceramics monominerality. *Neorganicheskie materialy*. 2018; 54 (9): 984–992. (In Russian)
8. Manankov A.V., Gasanova E.R. Glass-ceramics from local raw materials for the production of innovative infrastructures with high technical and economic efficiency in the Far North conditions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2018; 329 (11): 87–96. (In Russian)
9. Manankov A.V., Gasanova E.R., Bykova V.V. Physicochemical and technological aspects of glass-ceramics of a new class. *Vestnik Voronezhskogo GUIT*. 2018; 80 (1): 211–222. (In Russian)
10. Manankov A.V. Structural organization of innovative petrosittals from the local natural raw materials of the Polar Urals. *Insights in Mining Science and Technology*. 2020; 2 (1): 153–161. DOI: 10.19080/IMT.2020.02.555577 (In Russian)

11. Kipriyanov N.A., Gorichev N.G. Electron-proton theory as fundamental basis for physico-chemical process of leaching of oxide minerals in hydrometallurgy. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2006; 1 (12): 101–109. (In Russian)
12. Kondrat'yev B.K., Turchin V.I. Combused ion source. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 1994; (3): 106–111. (In Russian)
13. Turchin V.I., Rad'ko V.E. Diamond polishing device. Patent Russ. Fed. No. 2211760, 2003. (In Russian)
14. Shelli R. Jove. The Pribram-Bohm hypothesis a topology of consciousness. *Cosmos and History. The Journal of Natural and Social Philosophy*. 2016; 12 (2): 114–136.
15. Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment – A new violation of bell inequalities. *Physical Review Letters*. 1982; 49 (2): 91–94.
16. Talbot M. The holographic universe. Moscow: Sofia, 2004. 368 p. (Russian translation)
17. Kozyrev N.A. Causal or asymmetric mechanics in linear approximation. Pulkovo, 1958. 41 p. (In Russian)
18. Kuz'min A.M. Periodic-rhythmic phenomena in mineralogy and geology. Tomsk: STT, 2019. 336 p. (In Russian)
19. Parun V.E., Grinyayev Yu.V., Danilov V.I., Zuyev L.V., et al. Structural levels of plastic deformation and fracture. Novosibirsk: Nauka, 1990. 254 p. (In Russian)
20. Popsulin S. Russian scientist from Harvard made a breakthrough in the quantum computer space. *Izdaniye o vysokikh tekhnologiyakh*, 2012. (In Russian)
21. Korzhinskiy D.S. The theory of metasomatic zoning. Moscow: Nauka, 1982. 104 p. (In Russian)
22. Chepizhnyy K.I. New in mineralogy (theory of mineralogy). Leningrad: Nauka, 1988. 146 p. (In Russian)
23. Manankov A.V. Physicochemical foundations of nanostructural mineralogy in new material production. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; (2): 120–136. (In Russian)
24. Manankov A.V., Vladimirov V.M., Strakhov B.S. Mechanism for structure formation and non-equilibrium glass crystallization model (A review). *Glass and Ceramics*. 2015; (1): 3–10. DOI: 10.1007/s10717-015-9710-x
25. Trademark Certificate No. 92355 “SIKAM” is a new 19th class of artificial stones, building, non-metallic materials”, 1990. (In Russian)
26. Manankov A.V., Goryukhin E.Ya., Loktyushin A.A. Wollastonite, pyroxene and other materials from industrial waste and non-deficient natural raw materials. Tomsk: TSU, 2002. 168 p. (In Russian)
27. Manankov A.V., Vladimirov V.M., Gasanova E.R. Method for preparing metasilicate glass-ceramic mixture. Patent Russ. Fed. No. 2687014, 2019. (In Russian)
28. Loktyushin A.A., Manankov A.V. Mineral structure in holographic model of substance. *Struktura i evolyutsiya mineral'nogo mira*. Syktyvkar, 1997. Pp. 35–37. (In Russian)
29. Manankov A.V., Vladimirov V.M. On the mechanism and thermodynamic modeling of metasilicate glass ceramics crystallization. *Glass and Ceramics*. 2016; (6): 3–7. DOI: 10.1007/s10717-016-9856-1
30. Shubina Yu.S., Strakhov B.S., Manankov A.V. Geodynamics of the Arctic shelf and methane emanation from gas hydrates. In: *Proc. 9th All-Russ. Sci. Conf.*, Tomsk: TPU, 2016. Pp. 10–19. (In Russian)
31. Pavlushkin N.M. Fundamentals of glass-ceramic technology. Moscow: Stroyizdat, 1979. 340 p. (In Russian)
32. Vernadskii V.I. Scientific thought as a planetary phenomenon. Moscow: Nauka, 1991. 271 p. (In Russian)
33. Manankov A.V., Loktyushin A.A. Production method for porous vitrified block. Author's Certificate No. 1787965, 1993. (In Russian)
34. Manankov A.V., Karaush S.A. Production method and design of porous vitrified block. Patent Russ. Fed. No. 2525076, 2014. (In Russian)
35. Manankov A.V., Vladimirov V.M., Gasanova E.R. Production method for porous glass ceramics (options). Patent Russ. Fed. No. 2582152, 2015. (In Russian)

Сведения об авторах

Мананков Анатолий Васильевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Яковлев Валентин Михайлович, ст. науч. сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Локтюшин Александр Андреевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Горюхин Евгений Яковлевич, канд. геол.-мин. наук, гл. геолог, Томская комплексная геологоразведочная экспедиция, 634507, Томская область, Томский район, пос. Зональная Станция, База Ткгэ, 6.

Authors Details

Anatoly V. Manankov, DSc, Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Valentin M. Yakovlev, Senior Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia.

Aleksandr A. Loktyushin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Evgeniy Ya. Gorukhin, PhD, Chief Geologist, Tomsk Complex Exploration Company, 634507, Tomsk region, Zonal'naya Stantsiya, Tomsk, Russia.

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 28.03.2023
Одобрена после рецензирования 18.06.2023
Принята к публикации 20.06.2023

Submitted for publication 28.03.2023
Approved after review 18.06.2023
Accepted for publication 20.06.2023

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 161–175.

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 (4): 161–175.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.547;691.535

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-161-175

EDN: DQJVSC

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ КОМПЛЕКСНЫМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ВОДОЦЕМЕНТНУЮ СУСПЕНЗИЮ

Георгий Анатольевич Непомнящев, Михаил Михайлович Титов

Новосибирский государственный

архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В связи с потребностью строительной отрасли в интенсификации различных технологических процессов (бетонных работ и пр.) необходимо достичь сокращения сроков набора требуемых прочностных показателей бетона (проектная, распалубочная, критическая прочность и др.). Актуальной является разработка технологий, позволяющих ускорить процесс набора требуемых прочностных показателей конструкций из бетонов и повысить прочностные показатели в конкретные интервалы времени выдерживания конструкций.

Проведен анализ существующих технологий активации цементных суспензий, бетонов и растворов. Выявлены наиболее перспективные и менее изученные направления повышения прочностных показателей цементосодержащих материалов.

Основной *целью* исследования является поиск и подбор, сочетание наиболее оптимального режима обработки водоцементной суспензии, позволяющего получить кратное увеличение прочности цементного камня в первые семь суток, по сравнению с образцами на основе необработанной суспензии. В дальнейшем это должно позволить значительно уменьшить сроки производства бетонных работ за счет сокращения сроков набора требуемой распалубочной прочности конструкций.

Методы. Применена комбинация методов электрофизического воздействия, направленная на разработку технологии повышения прочностных показателей и ускорение набора прочности образцов цементного камня. Комбинация включает несколько мето-

дов электрофизической активации на основе электрополяризационной обработки, электрогидравлического удара и ультразвуковой обработки.

Результаты. Экспериментально подтверждено повышение прочностных показателей цементного камня в результате применения предложенной авторами комплексной электрофизической обработки, а также показано оптимальное водоцементное соотношение, которое дает наибольший прирост прочности образцов в возрасте семи суток.

Ключевые слова: водоцементная суспензия, гидратация, прочность, поляризация, электрогидравлический эффект, ультразвуковая обработка, цементный камень

Для цитирования: Непомнящев Г.А., Титов М.М. Повышение прочностных показателей цементного камня комплексным электрофизическим воздействием на водоцементную суспензию // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 161–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-161-175. EDN: DQJVSC

ORIGINAL ARTICLE

INCREASING CEMENT STRENGTH PROPERTIES WITH ELECTROPHYSICAL PROCESSING OF WATER-CEMENT SUSPENSION

Georgy A. Nepomnyashchev, Mikhail M. Titov

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

Abstract. Due to the need of the construction industry for the intensification of various technological processes, it is necessary to reduce the time of specifying concrete parameters such as design, stripping, critical strength. It is relevant to develop technologies allowing to accelerate the process of setting the required strength parameters of concrete structures and increase them at specific time intervals.

Activation technologies of cement suspensions, concretes and mortars are analyzed. The most promising and less studied directions in the strength properties improvement are identified.

The aim of this work is to identify the physical impact on cement-containing materials to accelerate the strength gain in cement paste. A combination of several methods of electrophysical processing is used to develop the method of strength improvement and gain in cement paste. Electrophysical processing is based on electric polarization, electro-hydraulic shock and ultrasonic treatment.

The paper proposes the most optimum mode for the water-cement suspension treatment, which provides a multiple increase in the strength gain in the first seven days, compared to the untreated suspension.

The proposed electrophysical processing significantly improves the strength of hydrated cement and the best water-cement ratio is obtained to highly increase the concrete strength after seven days.

Keywords: water-cement suspension, hydration, strength, polarization, electro-hydraulic effect, ultrasonic treatment, cement paste

For citation: Nepomnyashchev G.A., Titov M.M. Increasing cement strength properties with electrophysical processing of water-cement suspension. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 161–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-161-175. EDN: DQJVSC

Введение

В строительстве остро стоит проблема необходимости сокращения длительных по времени сроков набора распалубочной прочности бетона в монолитных конструкциях. Интенсифицировать процесс набора прочности бетонных конструкций возможно несколькими способами, одним из которых является способ активации компонентов, входящих в составы бетонов и растворов.

Активность портландцемента зависит от следующих факторов: минералогический состав, удельная поверхность цементных зёрен, наличие химических добавок и компонентов, вводимых в смесь [1].

Основными направлениями активации являются:

1. Химические методы: введение различных добавок (микрокремнезём [2, 3], зола-унос [4, 5, 6], каменная и известняковая мука [7, 8] и др.).

2. Механические методы: ультразвуковая обработка [9, 10], электрообработка, магнитная, плазменная [11, 12, 13, 14], вакуумная [15] и другие виды обработки.

3. Комбинированные методы: механотермическая, плазмохимическая, электрохимическая [11, 12, 13, 14] и другие виды обработки.

Анализ предшествующих исследований с учетом современных реалий показал, что наиболее перспективными для дальнейшего исследования являются способы на основе концентрации энергии электрических полей. Данные методы лежат в русле научно-технического прогресса, предполагающего использование концентрированной энергии для технологических целей и разработку устройств концентрации энергии. Например, лазерные, аддитивные, литографические технологии, т. е. технологии 6-го технологического уклада.

Особый интерес вызвали методы электрофизической активации различных материалов, изучаемые еще в 30-х гг. XX в. Л.А. Юткиным [11, 12]. В дальнейшем изучением этих методов занимались в ТГУ В.И. Курец [14], Б.В. Семкин [16], в ТГАСУ В.Н. Сафронов [13] и др. Вместе с тем все выше-названные исследователи использовали какое-то одно электрофизическое воздействие на различные материалы, и полученные ими величины прироста конечной прочности, как правило, укладывались в диапазон 10–30 % на водцементных суспензиях и 15–25 % на бетонах.

Поскольку любой технологический процесс основан на реализации какого-либо физического закона или эффекта, то и создание новой технологии, как правило, начинается с изучения и разработки физической основы нового технологического процесса.

Объект исследования – трехфакторное воздействие электрофизическими методами на объем водцементной суспензии.

Предмет исследования – величина получаемой прочности цементного камня в Н/мм², достигнутая в результате тех или иных электрофизических воздействий.

Целью проводимого исследования является получение кратного повышения прочностных показателей цементного камня путем применения электрофизических воздействий на водцементную суспензию.

В соответствии с заявленной целью сформулированы следующие задачи:

1. Исследование различных электрофизических воздействий на водоцементную суспензию, позволяющих повысить прочность цементного камня.

2. Подбор оптимального комплекса активационных воздействий, позволяющего получить кратное повышение прочностных показателей цементного камня.

3. Экспериментальное выявление степени влияния водоцементного соотношения активированной суспензии на конечную прочность в сравнении с контрольными образцами и предварительное теоретическое объяснение полученных результатов.

Для решения поставленных задач были изучены перспективные методы и разработаны лабораторные установки активации, на которых проводились экспериментальные исследования.

Наибольшим потенциалом для дальнейшего развития обладают методы на основе электрогидравлического удара [11, 12] на водоцементную систему и метод электрополяризационного воздействия на используемые материалы, достаточно широко применяемый в смежных отраслях знаний [17]. В совокупности с этими методами можно использовать достаточно хорошо изученный метод ультразвуковой обработки смеси [9, 10]. Эти методы хорошо изучены, но их одичное применение к обработке материалов любого типа дает низкий конечный эффект, не превышающий 15–35 % прироста прочностных показателей.

Наиболее эффективно использовать электрополяризационную обработку во время затворения, электроимпульсную обработку – после затворения, ультразвуковое воздействие применять на заключительном этапе, после электроимпульсной обработки.

Данная последовательность вытекает из очевидной физико-химической основы стадий растворения и набора прочности образующегося цементного камня.

На первом этапе – растворение цементного зерна – предполагается применение электрополяризационной технологии.

На основе изучения способа электрополяризации для увеличения глубины проникновения взаимодействующих материалов установлено, что при воздействии на цементосодержащую смесь высоким электростатическим напряжением в ней происходит ориентация молекул воды, поляризация двойного электрического слоя дисперсных частиц, электризация поверхностных зерен [18]. Это приведет к снижению энергии активации процессов гидратации и нуклеации [19, 20]. В результате может быть модифицирована структура новообразований цементного камня и контактной зоны, что даст более высокие показатели его физико-механических свойств.

До смешивания цемента и воды предполагается предварительный заряд разноименными потенциалами цементного порошка и воды затворения, чтобы с дальнейшей подачей цемента через зону высокой напряженности электрического поля к заряженной противоположным знаком воде происходило более глубокое естественное смачивание цемента. Последующее за смачиванием немедленное перемешивание позволяет более равномерно по объему распределить подвергнутые поляризации частицы цемента. В связи с тем, что цементу придается положительный потенциал, а воде отрицательный, из ранее про-

веденных исследований [18, 21] следует, что сила их взаимодействия увеличивается и реакция гидратации протекает более интенсивно.

Приготовленная таким образом водоцементная суспензия перемещается для последующей обработки электроимпульсным воздействием в реактор активации [22].

Электроимпульсное воздействие подразумевает на основе второго закона Ньютона ударное воздействие значительной интенсивности на обрабатываемую суспензию вследствие того, что само время воздействия крайне мало – сотни фемтосекунд, что даже при незначительных размерах цементных зерен и возникающих колоссальных ускорениях создает импульс невероятно большой мощности. Этот процесс сопровождается резким повышением давления, возникновением электромагнитных полей и появлением различного рода излучений: ультразвукового, светового, теплового, ультрафиолетового и рентгеновского [11, 12]. Но основным воздействием является импульс высокого давления, возрастающий мгновенно и создающий мощную ударную волну, воздействующую на цементные зерна. Это уменьшает размеры частиц за счет их раскалывания, трения, и впоследствии происходит открытие дополнительных площадей взаимодействия воды и цементного клинкера, что приводит к увеличению скорости их взаимодействия [23].

Затем водоцементная суспензия перемещается на заключительный этап – ультразвуковую обработку.

Ультразвук способен генерировать акустическую кавитацию в жидкой среде, а кавитация является движущей силой химических реакций. Вследствие данного процесса в суспензии образуется большой рост и схлопывание газовых микропузырьков, по теории горячих точек получают микровзрывы [24]. Кроме этого, ультразвук снижает вязкость и поверхностное натяжение воды, что увеличивает ее проникающую способность и смачивание открывшихся поверхностей цементных зерен [25].

По известному физическому принципу суперпозиции суммарный эффект от трех различных по физической природе воздействий на водоцементную суспензию должен позволить получить заметно больший конечный эффект по приросту прочности цементного камня на сжатие, что в итоге, как конечная цель, позволит сократить срок набора требуемой (распалубочной) прочности бетона в конструкциях.

Эксперимент проводился на базе лаборатории кафедры ТОС НГАСУ (Сибстрин).

В целях проведения экспериментальной работы выполнены установки для электрополяризационной, электроимпульсной и ультразвуковой обработки.

Электрополяризационная обработка. Такая обработка выполнялась при помощи установки, принципиальная схема которой в разрезе представлена на рис. 1, на рис. 2 показан вид установки в плане, на рис. 3 – фотография одного из первых вариантов такой установки.

Компоненты цементной суспензии, воду и цемент, делят по массе на заранее рассчитанные порции, необходимые для получения требуемого водоцементного соотношения. Выполненные навески материалов помещают в специальные емкости для цемента 6 и для воды 7. Ёмкость с цементом 6 распола-

гается в непосредственной близости (на высоте на 10–15 % больше, чем высота пробоя воздушного промежутка при заданном напряжении) к поверхности воды в емкости 7. После подключения требуемого напряжения наблюдается равномерное движение емкости 6 над поверхностью воды. Происходит поляризация цементного порошка при просеивании цемента через металлическое сито внизу емкости 6 и последующее его оседание на поверхность поляризованной противоположным знаком воды. При этом выполняется непрерывное перемешивание в зоне 2 цемента, смоченного водой в зоне 3. Само перемещение вдоль емкости с водой происходит со скоростью, определяемой скоростью процесса смачивания цемента водой.

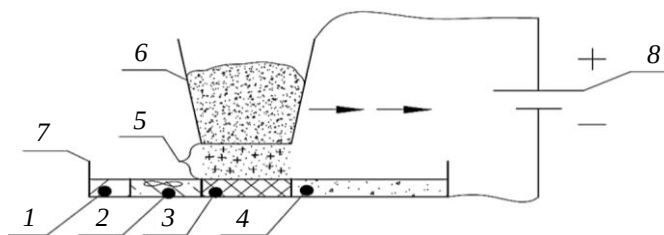


Рис. 1. Принципиальная схема поляризационной установки:

1 – зона обработанной водоцементной суспензии; 2 – зона смешивания просеянного цемента с водой; 3 – зона смешения противоположно заряженных цемента и воды; 4 – зона заряженной воды; 5 – зона напряженности высокого электрического потенциала; 6 – емкость с ситом в нижней горизонтальной плоскости для просеивания и поляризации цемента; 7 – емкость для поляризации воды; 8 – источник высокого напряжения (15 кВ)

Fig. 1. Schematic of polarization unit:

1 – treated water-cement suspension; 2 – sieved cement mixed with water; 3 – oppositely charged cement and water mix; 4 – charged water; 5 – high electric potential intensity; 6 – vessel with a sieve in the lower horizontal plane for cement sieving and polarization; 7 – vessel for water polarization; 8 – 15 kV source

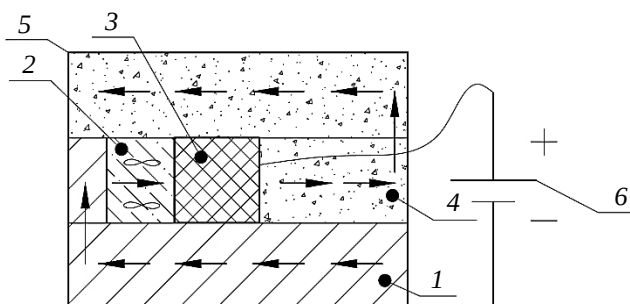


Рис. 2. Вид в плане схемы поляризационной установки:

1 – зона обработанной водоцементной суспензии; 2 – зона смешивания просеянного цемента с водой; 3 – зона смешения противоположно заряженных цемента и воды; 4 – зона заряженной воды; 5 – емкость для поляризации воды; 6 – источник высокого напряжения (15 кВ)

Fig. 2. Plan view of polarization unit:

1 – treated water-cement suspension; 2 – sieved cement mixed with water; 3 – oppositely charged cement and water mix; 4 – charged water; 5 – vessel for water polarization; 6 – 15 kV source

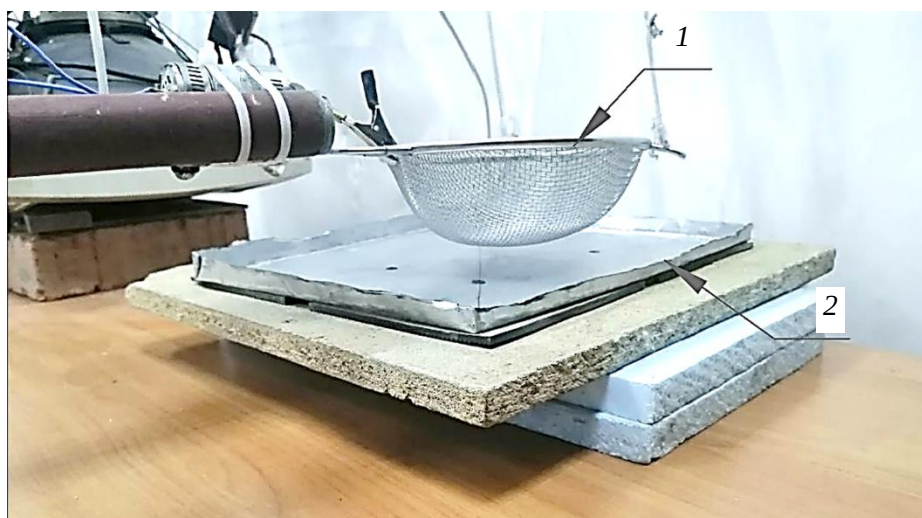


Рис. 3. Фото поляризационной установки:

1 – емкость с ситом в нижней горизонтальной плоскости для просеивания и поляризации цемента; 2 – емкость для поляризации воды

Fig. 3. Photograph of polarization unit:

1 – vessel with a sieve in the lower horizontal plane for cement sieving and polarization; 2 – vessel for water polarization

Представленная технологическая установка для выполнения поляризационной обработки запатентована авторами статьи.

После завершения процесса электрополяризации всего приготовленного объема суспензии его перемещают на следующий этап – электроимпульсную обработку.

Электроимпульсная обработка. Анализ ранее описанных в литературе устройств [11, 12, 13, 14] для электрогидравлического воздействия показал, что практически на всех устройствах воздействие производилось на применяемые материалы сверху или в объеме материала, но всегда при свободной (открытой) верхней горизонтальной поверхности, что значительно снижало образование вторичных волн воздействия на обрабатываемый материал. С целью усовершенствования технологии авторами данной работы был предложен и запатентован способ активации цементной суспензии [22]. Для более рационального использования энергии электрогидравлического удара (взрыва) обрабатываемый объем смеси помещают в жесткую металлическую камеру и сверху закрывают плотной металлической крышкой, при помощи которой предварительно создается избыточное давление.

Установка выполнена по схеме на рис. 4. Реактор активации представлен на рис. 5, а фото всей экспериментальной установки дано на рис. 6.

Цементная суспензия помещается в разрядную зону 2 в промежутке между разрядниками 1 (рис. 5), и ей придается небольшое избыточное давление посредством затягивания четырех болтов, расположенных по контуру реактора.

Затем включается источник высокого напряжения 1 (рис. 4), напряжение стабилизуется диодом 2, выполняется заряд конденсаторов 3. При достижении

требуемой величины заряда происходит пробой воздушного разрядника 4, замыкание цепи в реакторе активации 5, образуется электрический разряд в цементной суспензии (электрогидравлический удар), сопровождающийся комплексом сопутствующих явлений (резкое повышение давления в разрядной области; мощные импульсно возникающие кавитационные процессы; механические резонансные явления с амплитудами, позволяющими осуществлять взаимное отслаивание друг от друга многокомпонентных твердых тел; магнитное воздействие; ионизация суспензии). Время выполнения электрогидравлического удара от начала затворения цемента водой варьируется в зависимости от исходного сырья и целей обработки. Как правило, оптимальное время от смешивания компонентов сырья до начала обработки при использовании ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б АО «Искитимцемент» составляет 30–45 мин [22].

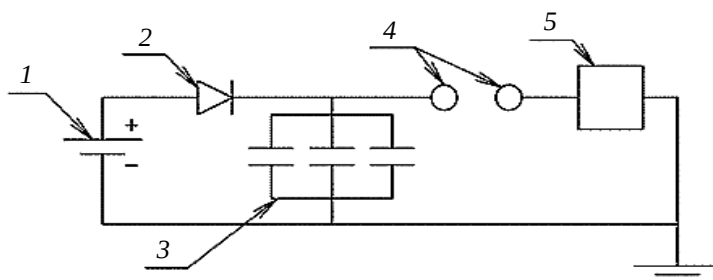


Рис. 4. Принципиальная схема установки электроимпульсной обработки водоцементной суспензии:

1 – источник высокого напряжения (15 кВ); 2 – высоковольтный диод; 3 – заряжаемые конденсаторы; 4 – воздушный разрядник; 5 – реактор активации

Fig. 4. Schematic diagram of electric pulse unit for treatment of water-cement suspension:

1 – 15 kV source; 2 – high voltage diode; 3 – chargeable capacitors; 4 – air-gap arrester; 5 – activation reactor

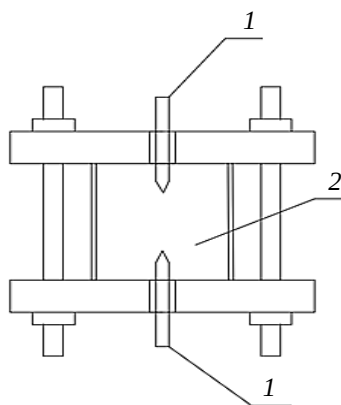


Рис. 5. Схема реактора активации:

1 – разрядники; 2 – разрядная область (зона активации водоцементной суспензии небольшим избыточным давлением)

Fig. 5. Schematic of activation reactor:

1 – dischargers; 2 – discharge area (water-cement suspension activation with slight overpressure)

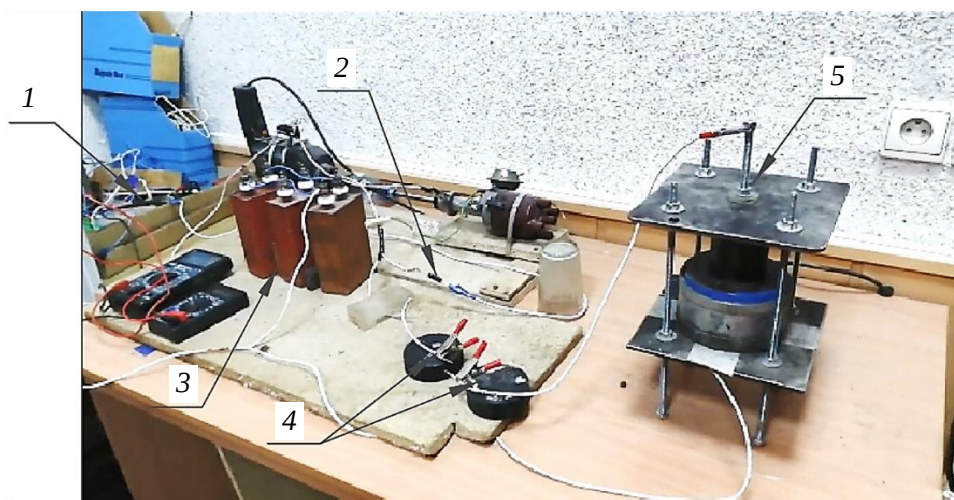


Рис. 6. Фото экспериментальной установки по активации методом электрогидравлического удара:

1 – источник высокого напряжения (15 кВ); 2 – высоковольтный диод; 3 – заряжаемые конденсаторы; 4 – воздушный разрядник; 5 – реактор активации

Fig. 6. Photograph of experimental unit for electrohydraulic shock activation:

1 – 15 kV source; 2 – high-voltage diode; 3 – chargeable capacitors; 4 – air-gap arrester; 5 – activation reactor

После прохождения обработки суспензия извлекается из реактора активации и укладывается в емкость для последующей ультразвуковой обработки.

Ультразвуковая обработка. Для проведения ультразвуковой обработки использовался прибор Ultrasonic Cleaner SUS304 с ультразвуковой частотой 40 кГц (рис. 7).



Рис. 7. Прибор для ультразвуковой обработки цементной суспензии

Fig. 7. Ultrasonic cleaner for water-cement suspension

Извлеченная из реактора суспензия помещается в установку для ультразвуковой обработки и подвергается воздействию в течение 5 мин, срок обработки был определен экспериментально, и увеличение времени не показало заметного набора конечной прочности.

Прошедшая все 3 стадии электрофизической обработки водоцементная суспензия помещалась в три стандартные металлические формы для получения 18 стандартных образцов цементного камня размером 20×20×20 мм.

При достижении образцами возраста 1, 3 и 7 сут производилось испытание прочности на одноосное сжатие при помощи испытательного комплекса КСИМ-40, результаты которого представлены в табл. 1 и 2, также на рис. 8 и рис. 9 при водоцементном соотношении 0,3 и 0,5 соответственно.

Все образцы, подвергнутые обработке, и необработанные выдерживались в одинаковых условиях при соблюдении нормального температурно-влажностного режима твердения в соответствии с ГОСТ 30744–2001 «Цементы».

Результаты проведенного экспериментального исследования

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде табл. 1 и 2, а также диаграмм на рис. 8 и 9.

Таблица 1

Показатели прочности на сжатие образцов в различные сроки твердения при В/Ц = 0,3, Н/мм²

Table 1

Compressive strength at different curing time at w/c ratio 0.3, N/mm²

Вид обработки	Выдержка, сут		
	1	3	7
Обработка	26,8	67,2	96,5
Без обработки	16,4	40,8	57

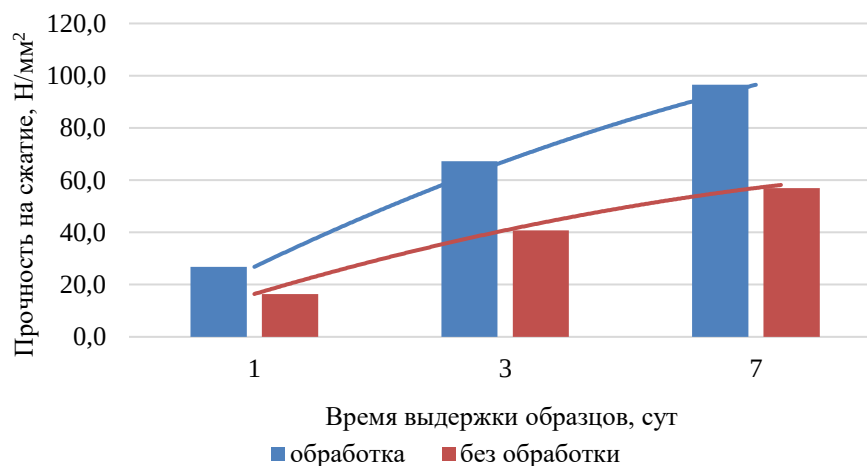


Рис. 8. График результатов комплексного эксперимента при водоцементном соотношении 0,3
Fig. 8. Block diagram of integrated experiment at w/c ratio 0.3 N/mm²

Таблица 2

Показатели прочности на сжатие образцов в различные сроки твердения при В/Ц = 0,5, Н/мм²

Table 2

Compressive strength at different curing time at w/c ratio 0.5 N/mm²

Вид обработки	Выдержка, сут		
	1	3	7
С обработкой	13,6	34,0	49
Без обработки	7,1	17,4	24

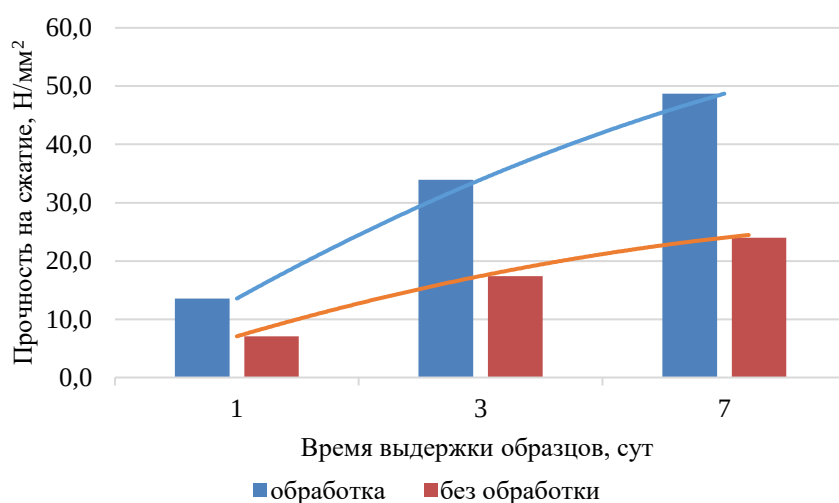


Рис. 9. График результатов комплексного эксперимента при водоцементном соотношении 0,5

Fig. 9. Block diagram of integrated experiment at w/c ratio 0.5 N/mm²

Визуально представленные результаты по проведенным экспериментальным исследованиям показывают весьма значительный прирост прочностных показателей получаемого цементного камня на основе обработанной трехстадийным методом водоцементной суспензии по сравнению с образцами, выполненными на основе необработанной суспензии.

Показатели прироста прочности на сжатие практически одинаковы на первые, третьи и седьмые сутки при В/Ц 0,3 в районе 65 %, а для В/Ц 0,5 – в районе 95 %. Постоянство этих показателей говорит о том, что сами по себе условия твердения практически не влияют на процент прироста прочности.

Можно говорить о том, что никаких новых физических процессов при самом процессе твердения не происходит, а сами процессы от стадии приготовления суспензии к стадии кристаллизации проходили глубже, большая часть цемента подверглась растворению, и тем самым повысилась его активность.

Поскольку среды идентичны во всей партии экспериментов, то и логарифмический закон набора прочности не изменился, а изменилась лишь активность цемента, интенсивность набора прочности цементного камня.

Мы достигли повышения активности цемента, поскольку ни температурных воздействий, ни добавок, никаких других способов повышения прочности на суспензию не применяли, воздействуя только электрофизическим методом на суспензию. По предварительным оценкам, в проведенном эксперименте затраты электроэнергии значительно меньше, чем при увеличении температуры выдерживания образцов паропрогревом или электротермическим прогревом для достижения аналогичных показателей прочности цементного камня.

Сравнение влияния каждого отдельного этапа комплексных воздействий на конечную прочность в данной серии экспериментов не проводилось. Однако, основываясь на материалах литературных источников и вышеописанных предварительных экспериментальных данных, можно заключить, что в целом суммарный эффект достигается не только за счет принципа суперпозиции (путем складывания всех эффектов, от каждого метода по отдельности), но также и за счет оптимально подобранной последовательности воздействий, позволяющей повысить эффективность каждого из предложенных методов. При этом итоговый результат больше примерно на 25 % суммарного процента. Авторы предполагают, что этот процент может быть увеличен при использовании более энергетически мощного оборудования, позволяющего увеличить напряжение, силу тока, емкость конденсаторных батарей, а также больших объемов водоцементной суспензии.

Выводы

Установлено, что применение комплекса предлагаемых электрофизических воздействий повышает прочность цементного камня на 63,4–104,2 % по сравнению с контрольными образцами в зависимости от В/Ц.

Установлено, что влияние В/Ц на результаты весьма значительно, и при использовании В/Ц 0,5 удельный прирост прочности выше, чем при В/Ц 0,3, на 30 % в течение всего периода твердения.

Установлено, что оптимальным комплексом воздействия является электрополяризационное, электроимпульсное и ультразвуковое электрофизическое воздействие.

Установлено, что твердение цементного камня на основе обработанной суспензии происходит по тем же закономерностям, что и на основе необработанной суспензии.

Таким образом, цель проводимого исследования достигнута, поскольку установлено повышение прочности цементного камня до 2 раз вследствие применения комплексного электрофизического воздействия. Также определены наиболее эффективные виды электрофизических воздействий на водоцементную суспензию.

В дальнейшем предполагается изучение влияния различных напряженностей электрических полей при электрополяризационном воздействии, влияния электрической мощности при электрогидравлическом воздействии и результат их суммарного воздействия на конечную прочность.

Также необходимо выявить степень влияния комплексного воздействия на конечную прочность цементного камня в возрасте до 28 сут, а также на технологические параметры водоцементной суспензии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bullard J.W., Jennings H.M., Livingston R.A., Nonat A., Scherer G.W., Schweitzer J.S., Scrivener K.L., Thomas J.J. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*. 2011(41); № 12:1208–1223.
2. Крамар Л.Я., Кудяков А.И., Трофимов Б.Я., Шуляков К.В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (63). С. 147–157.
3. Ильина Л.В., Кудяков А.И., Туляганов А.К. Цементные растворы с тонкодисперсными минеральными добавками // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 12 (732). С. 32–43.
4. Губарь В.Н., Петрик И.Ю., Жибоедов А.В. Способы повышения качества золы-уноса ТЭС, применяемой в высококачественных бетонах // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (119). С. 63–70.
5. Муртазаев С.А.Ю., Саламанова М.Ш., Куразов М.С., Индарбаев М.И., Эльмурзаев Р.А. Разработка составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов на основе комплексных модификаторов // Устойчивое развитие науки и образования. 2017. № 11. С. 102–108.
6. Матвеева М.А., Солонина В.А., Ильясова С.В. Наполнение матрицы цементного вяжущего // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов, посвященной 10-летию создания Института промышленных технологий и инжиниринга. Тюмень : ТИУ, 2018. Т. 2. С. 71–73.
7. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Никоненко Н.И. Влияние дисперсных минеральных наполнителей на прочность цементного камня // Актуальные вопросы строительства : материалы V Всероссийской научно-технической конференции / отв. за выпуск Ю.Л. Сколупович. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2012. Т. 1. С. 257–260.
8. Паломо А., Мальцева О., Фернандес-Хименес А. Промышленность в XXI веке. Новые добавки в цемент и бетон. Ч. I // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2015. № 2–3 (39). С. 30–41.
9. Hielscher K. Ultrasonic Milling and Dispersing Technology for Nano-Particles // Materials Research Society symposia proceedings. Materials Research Society. 2012. № 1479. P. 21–26.
10. Ganjiana E., Ehsania A., Mason J.T., Tyrera M. Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives // Materials & Design. 2018. P. 503–513.
11. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 253 с.
12. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. Москва ; Ленинград : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1955. 54 с.
13. Сафронов В.Н. Электрофизические технологии в производстве строительных материалов. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2014. 420 с.
14. Курец В.И., Лобанова Г.Л., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Активация цементных растворов электрическими разрядами // Электронная обработка материалов. 2003. № 1. С. 76–80.
15. Соколов И.А., Березюк А.Н., Дикарев К.Б., Аббасова А.Р. Вакуумная технология возведения конструкций из монолитного бетона // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2013. № 5. С. 16–21.
16. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов / под. ред. Н.П. Тузова. Санкт-Петербург : Наука, 1995. 276 с.
17. Патент № 2343010 Российская Федерация, МПК B05D 1/04 (2006.01). Способ электро-статического окрашивания диэлектрических изделий : № 2007110451 : заявл. 30.05.2007 : опубл. 01.10.2010 / Шангин А.П., Звоник В.В., Лапицкий А.Г., Цугленок В.Н., Вержболович Н.А., Дыба Д.С. ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Производственная компания “Теплофон”». – 4 с.
18. Матвиенко В.А. Электрическая активация в технологии бетона и изделий : специальность 05.23.05 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Харьковский инженерно-строительный институт. Харьков, 1993. 34 с.
19. Матвиенко В.А., Черешня О.Ф. Электрическая поляризация и структурообразование вяжущих систем / Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции : доклады и тезисы

- докладов III Всесоюзной научно-практической конференции. Киев : КИСИ, 1989. Т. 1. С. 152–153.
20. Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А. Электрические свойства бетона / под ред. Ю.Н. Вершинина. Москва : Энергия, 1980. 199 с.
 21. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы / под ред. Е.Д. Щукина. Москва : Наука, 1985. 400 с.
 22. Патент № 2769495 Российская Федерация, МПК C04B 40/00 (2006.01). Способ активации цементной суспензии : № 2021110875 : заявл. 15.04.2021 : опубл. 01.04.2022 / Титов М.М., Непомняцев Г.А., Дорофеева Д.А. ; заявитель НГАСУ (Сибстрин). Бюл. № 10. 8 с.
 23. Бордунов С.В., Кулага И.Г. Использование высоковольтного импульсного разряда для повышения прочности бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 4. С. 58–61.
 24. Fitzgerald M.E., Griffing V., Sullivan J. Chemical effects of ultrasonics – «hot spot» chemistry // Journal of Chemical Physics. 1956. V. 25. I. 5. P. 926–933.
 25. Себелев И.М. Закономерности гидратации клинкерных минералов и повышение эффективности использования цемента по результатам лазерной гранулометрии : специальность 05.17.11 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Томск : ТПУ, 1998. 38 с.

REFERENCES

1. Bullard J.W., Jennings H.M., Livingston R.A., Nonat A., Scherer G.W., Schweitzer J.S., Scrivener K.L., Thomas J.J. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*. 2011; 12 (41):1208–1223.
2. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. Cement heavy concretes for highway construction. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; 4 (63): 147–157. (In Russian)
3. Il'ina L.V., Kudyakov A.I., Tulyaganov A.K. Cement mortars with fine mineral additives. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2019; 12 (732): 32–43. (In Russian)
4. Gubar' V.N., Petrik I.Yu., Zhiboedov A.V. Quality improvement of TPP fly ash used in high quality concrete. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2016; 3 (119): 63–70. (In Russian)
5. Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Kurazov M.S., Indarbaev M.I., El'murzaev R.A. Development of high-strength self-compacting concrete compositions based on complex modifiers. *Ustoichivoe razvitie nauki i obrazovaniya*. 2017; 11: 102–108. (In Russian)
6. Matveeva M.A., Solonina V.A., Ilyasova S.V. Filling of the cement binder matrix. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists 'Energy Saving and Innovation Technologies in Fuel and Energy Sector'*. Vol. 2. Tyumen, 2018. Pp. 71–73. (In Russian)
7. Berdov G.I., Il'ina L.V., Nikonenko N.I. Effect of dispersed mineral fillers on the strength of cement stone. In: *Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Construction'*. V. 1. 2012. Pp. 257–260. (In Russian)
8. Palomo A., Mal'tseva O., Fernandes-Khimenos A. Industry in the 21st century. New additives in cement and concrete. Part I. *Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2015; 2–3 (39): 30–41. (In Russian)
9. Hielscher K. Ultrasonic milling and dispersing technology for nano-particles. *Materials Research Society Symposia Proceedings*. 2012; (1479): 21–26.
10. Ganjiana E., Ehsania A., Mason J.T., Tyrera M. Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives. *Materials & Design*. 2018; 503–513.
11. Yutkin L.A. Electrohydraulic effect and its application in industry. Leningrad: Mashinostroenie, 1986. 253 p. (In Russian)
12. Yutkin L.A. Electrohydraulic effect. Moscow; Leningrad, 1955. 54 p. (In Russian)
13. Safronov V.N. Electrophysical technologies in the production of construction materials. Tomsk: TSUAB, 2014. 420 p. (In Russian)
14. Kurets V.I., Lobanova G.L., Filatov G.P., Yushkov A.Yu. Activation of cement mortars by electric discharges. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2003; 1): 76–80. (In Russian)
15. Sokolov I.A., Berezyuk A.N., Dikarev K.B., Abbasova A.R. Vacuum technology of monolithic concrete structures. *Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitekturi*. 2013; (5):16–21. (In Russian)

16. Semkin B.V., Usov A.F., Kurets V.I. Fundamentals of electric pulse fracture of materials. N.P. Tuzov, Ed. Saint-Petersburg: Nauka, 1995. 276 p. (In Russian)
17. Shangin A.P., Zvonik V.V., Lapitskii A.G., Tsuglenok V.N., Verzhbolovich N.A., Dyba D.S. "Method of electrostatic coloring of dielectric articles", Patent Russ. Fed. No. 2007110451, 2010, 4 p. (In Russian)
18. Matvienko V.A. Electrical activation in the technology of concrete and products. DSc Abstract. Kharkov, 1993. 34 p. (In Russian)
19. Matvienko V.A., Chereshnya O.F. Electric polarization and structure formation of binding systems. In: *Proc. 3rd All-Union Sci. Conf. 'Alkali Cements, Concretes and Structures'*. Vol. 1. Kiev: KISI, 1989. Pp. 152–153. (In Russian)
20. Bernatskii A.F., Tselebrovskii Yu.V., Chunchin V.A. Electrical properties of concrete. Yu.N. Vershinin, Ed. Moscow: Energiya, 1980. 199 p. (In Russian)
21. Deryagin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. Surface forces. E.D. Shchukin, Ed., Moscow: Nauka, 1985. 400 p. (In Russian)
22. Titov M.M., Nepomnyashchev G.A., Dorofeeva D.A. "Method of activation of cement slurry", Patent Russ. Fed. No. 2769495, 2022, 8 p. (In Russian)
23. Bordunov S.V., Kulaga I.G. Utilization of high-voltage pulse discharge for concrete strength improvement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012; (4): 58–61. (In Russian)
24. Fitzgerald M.E., Griffing V., Sullivan J. Chemical effects of ultrasonics – "hot spot" chemistry. *Journal of Chemical Physics*. 1956; 25 (5): 926–933.
25. Sebelev I.M. Clinker mineral hydration and efficiency improvement of cement utilization based on laser granulometry results. DSc Abstract. Tomsk: TPU, 1998. 38 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Непомняцев Георгий Анатольевич, аспирант, ст. преподаватель, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Georg060593@mail.ru

Титов Михаил Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, agd_tmm48@mail.ru

Authors Details

Georgii A Nepomnyashchev, Research Assistant, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, Georg060593@mail.ru

Mikhail M Titov, DSc, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, agd_tmm48@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 22.03.2023
Одобрена после рецензирования 12.05.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 22.03.2023
Approved after review 12.05.2023
Accepted for publication 16.06.2023

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 176–188.

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 (4): 176–188.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-176-188

EDN: RETTIA

ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ БУТОВОГО ФУНДАМЕНТА НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ КИРПИЧНЫХ СТЕН ЗДАНИЯ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

**С.В. Ющубе, И.И. Подшивалов, А.А. Тарасов,
А.В. Бурмин, В.Л. Устюжанин**

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

Аннотация. Объектом исследования является двухэтажное кирпичное здание постройки 1854 г., длительное время (в течение 168 лет) бывшее в эксплуатации и получившее значительные деформации стен и столбов.

Целью работы стало определение несущей способности стен и столбов здания в условиях значительных перемещений бутового фундамента, расположенного на нестабильном грунтовом основании.

Вследствие негативного воздействия многократного промораживания и оттаивания грунтов, сил морозного пучения на бутовый фундамент и геотехнического влияния со стороны р. Томи, выражающегося в значительном колебании уровня воды в меженный и паводковый периоды и его гидравлической связи с подземными водами в основании здания, фундаменты получили существенные и неравномерные осадки. В результате воздействий пространственная жесткость здания исторической застройки оказалась нарушена с образованием трещин в кирпичных стенах и столбах.

По материалам обследования было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния здания в программном комплексе Ing+2021 MicroFe с разработкой конечно-элементной расчетной модели.

Полученные результаты позволили разработать рекомендации по обеспечению необходимой пространственной жесткости кирпичного здания путем усиления с внешней стороны наружных стен напрягаемыми стальными тяжами, расположенными в уровне междуэтажного и чердачного перекрытий.

Ключевые слова: кирпичное здание, стены, столбы, бутовый фундамент, неравномерные перемещения, деформации, расчетная модель, пространственная жесткость, усиление

Для цитирования: Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А., Бурмин А.В., Устюжанин В.Л. Влияние неравномерных перемещений бутового фундамента на несущую способность кирпичных стен здания исторической застройки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 176–188. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-176-188. EDN: RETTIA

ORIGINAL ARTICLE

THE INFLUENCE OF NONUNIFORM MOVEMENT OF RUBBLE FOUNDATION ON BEARING CAPACITY OF BRICK WALLS OF A HISTORIC BUILDING

S.V. Yushchube, I.I. Podshivalov, A.A. Tarasov,

A.V. Burmin, V.L. Ustyuzhanin

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. *Purpose:* The aim of the work is to determine the bearing capacity of walls and columns of the building during significant movement of its natural-stone foundation on unstable soil.

Methodology: The finite-element model of stress-strain state is developed by using Ing+2021 MicroFe software package.

Research findings: During 168 years of the long-term service since 1854, the negative effect from soil frost-thawing, frost heave of the rubble foundation, and geotechnical influence of the Tom river, provided a significant fluctuation of the water level during low-water and flood periods. The foundation was considerably settled, that disturbed the spatial rigidity of the historic building.

Practical implications: The obtained results can be used to develop recommendations for ensuring necessary spatial rigidity of the brick building via the reinforcement of exterior walls with tensioned steel ties on inter-floor and attic ceilings.

Keywords: brick building; walls, column, rubble foundation; nonuniform movement, deformation; theoretical model; spatial rigidity; reinforcement

For citation: Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A., Burmin A.V., Ustyuzhanin V.L. The influence of nonuniform movement of rubble foundation on bearing capacity of brick walls of a historic building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 176–188. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-176-188. EDN: RETTIA

Введение

Для зданий исторической застройки характерен длительный период эксплуатации. Как правило, стены таких зданий возводили из красного глиняного кирпича на известково-песчаном растворе. Фундаменты выполнялись из бута, реже из красного кирпича, также на известково-песчаном растворе. Иногда между бутовым камнем просто пересыпался песок. Под подошвой для выравнивания основания нередко укладывали деревянные лежни и настилы,

иногда отсыпался слой песка. В ходе эксплуатации зданий исторической застройки довольно часто возникала деструкция бутовой кладки с вымыванием раствора и выпадением отдельных камней под воздействием сезонного промерзания-оттаивания и сил морозного пучения [1], происходило гниение деревянных лежней.

Появление и развитие трещин вертикальной ориентации в кирпичных стенах зданий может быть обусловлено локальными разрушениями бутовых фундаментов, причинами которых, как правило, является выщелачивание кладочного раствора из-за негативного геотехнического воздействия или некачественного выполнения фундаментов [2]. Например, расчетное сопротивление кладки фундамента при прочности бута в водонасыщенном состоянии, соответствующей марке М50, и остаточной прочности раствора, соответствующей марке М4, с учетом снижения несущей способности кладки при средней степени ее разрушения по табл. 8¹ будет составлять $R = 0,75 \times 0,6 = 0,45$ МПа, что сопоставимо с расчетным сопротивлением грунта.

Характеру трещинообразования, при котором за счет равномерных деформаций кладки появляются вертикальные трещины в стенах, соответствуют экспериментальные исследования кладки по классической схеме, когда сжатие образцов происходит в ортогональном направлении к горизонтальным швам кладки. При нагружении фрагментов кладки возникновение первых трещин происходит в результате появления напряжений изгиба и среза отдельных кирпичей за счет неравномерной плотности раствора в швах. Разрушение кирпича от сжатия возникает на стадии, когда образец расчленен вертикальными трещинами на отдельные элементы [3].

В случае неравномерных деформаций кладки, когда имеются наклонные трещины в стенах, наиболее близкими к такому напряженно-деформированному состоянию являются экспериментальные исследования на действие сжимающей нагрузки, приложенной по диагонали фрагментов кирпичной кладки. Установлено, что при нагружении этих фрагментов в процессе перераспределения внутренних усилий преобладающее значение получили главные растягивающие деформации, которые явились основной причиной разрушения испытываемых образцов [4, 5].

Монолитность кирпичной кладки стен зданий определяется главным образом величиной нормальных и касательных сил сцепления ее материалов. Поскольку в хрупком каменном материале предел упругости близок к пределу прочности при сжатии, то при достижении последнего параметра происходит истощение несущей способности и разрушение кладки [6].

Восстановление и усиление кирпичной кладки можно осуществить различными способами, в том числе устройством железобетонных, металлических или армированных растворных обойм. В этом случае кладка работает в условиях всестороннего сжатия и ограничения свободы ее поперечного расширения, что позволяет увеличить ее сопротивляемость внешним воздействиям [7].

¹ Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий // ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Москва, 1988. С. 35.

Экспериментальные исследования образцов старой кладки, усиленных новой кладкой, с их взаимной перевязкой, показали, что их несущая способность примерно в два раза ниже, чем эталонных образцов из монолитной кладки [8].

В работе [9] приведены результаты экспериментальных исследований фрагментов каменной кладки по влиянию композитных материалов на основе углеродных волокон на несущую способность и деформативность фрагментов при действии статической нагрузки, где определен механизм работы усиленных образцов, а также влияние элементов усиления на изменение несущей способности каменной кладки.

Инъектирование, как способ заделки трещин в кирпичных стенах, позволяет заполнить трещины и пустоты в кладке, увеличить плотность конструкции. Основой инъекционных материалов являются полимерцементные композиции [10].

В настоящее время достаточно успешно выполняется моделирование в расчетных комплексах конструкций из каменных материалов любой, в том числе достаточно сложной геометрической конфигурации и конструктивной схемы, а также с учетом ортотропных свойств материалов кладки [11]. Разрабатываются подходы к расчету методом конечных элементов каменной кладки при плоском напряженном состоянии в областях отрыва и сдвига двухуровневым методом, когда свойства кладки исследуются на ограниченном в габаритах фрагменте в виде микромоделей, а затем полученными параметрами наделяется кладка всей конструкции в макромоделей [12].

В исследовании [13] разработана методика расчета на основе теории сопротивления анизотропных материалов, которая позволяет выявить особенности напряженно-деформированного состояния и характера разрушения конструкций из каменной кладки.

Численные исследования, выполненные на основе разработанной дискретной модели каменной кладки, позволяют оценить степень влияния деформационного и прочностного параметров на схему упругопластического деформирования модели, а также определить резервы несущей способности каменных конструкций [14].

При проведении геотехнического мониторинга здания, получившего значительные неравномерные осадки фундамента, как правило, выполняются следующие работы: инструментальное обследование строительных конструкций и фундамента; геодезические измерения деформаций здания; дополнительные инженерно-геологические изыскания; поверочные расчеты [15]. По результатам выполненных работ предлагаются рекомендации и технические решения по восстановлению эксплуатационной пригодности здания [16].

Результаты исследования

В статье рассматривается здание – биржевой корпус постройки 1854 г., который представляет собой двухэтажное кирпичное прямоугольное в плане здание без подвала. По периметру объекта с трех сторон устроена открытая обходная галерея, обрамляющая западный, северный и восточный фасады. Биржевой корпус использовался как универсальное торговое заведение.

Конструктивная схема здания биржи столбчато-стеновая, состоит из кирпичных продольных и поперечных несущих стен во внутреннем теплом контуре и из кирпичных столбов и колонн во внешнем холодном контуре галереи (рис. 1). Фундамент бутовый ленточного типа.

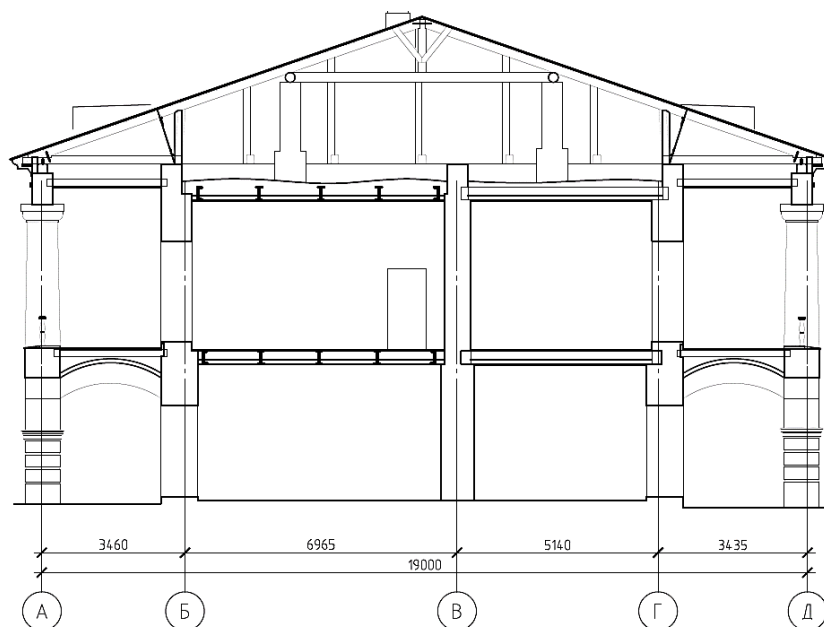


Рис. 1. Схема поперечного разреза здания
Fig. 1. Cross-sectional view of the building

При обследовании здания было установлено, что во внутреннем теплом контуре в уровне межэтажного и чердачного перекрытий по всем наружным и внутренним стенам проложены настенные связи из кованных пластин «на ребро» высотой 80 мм, толщиной 20–30 мм. Настенные связи длиной 4–6 м соединены между собой по углам и по длине стен коваными обухами, состоящими, с одной стороны, из петли, а с другой – из обхватывающей вилки с двумя петлями. В кованные обухи вставляются штыри длиной 70–75 мм, диаметром 25–30 мм. В наружных стенах настенные связи расположены на глубине 150 мм с внешней стороны, во внутренних стенах – посередине. Кроме того, в уровне каждого перекрытия кованные связи проложены также от столбов галереи к наружным стенам внутреннего теплого контура. Чердачное и междуэтажное перекрытия внутреннего теплого контура сталежелезобетонные, выполнены из прокатных металлических балок из двутавра I30 и из швеллера U30 (расположены вдоль стен), раскрепленных снизу монолитными железобетонными плитами толщиной 80 мм.

Во внешнем холодном контуре галерея первого этажа состоит из кирпичных столбов по фасаду и монолитных железобетонных крестовых сводов, которые заменили собой ранее существовавшие кирпичные своды. Крестовые своды состоят из скорлупы толщиной 100 мм с контурными размерами

в плане 2800×2450 мм. Скорлупа свода по контуру монолитно сопряжена с четырьмя подпружными монолитными железобетонными арками, образуя единую пространственную конструкцию. По фасаду подпружные арки облицованы кирпичной кладкой. Галерея второго этажа представляет собой колоннаду из круглых кирпичных столбов диаметром 870 мм.

При обследовании здания было обнаружено интенсивное трещинообразование в стенах и столбах с различной ориентацией трещин и значительной шириной их раскрытия до 20 мм. Основной причиной повреждения стен и столбов явились неравномерные осадки бутового фундамента, вызванные нестабильностью грунтового основания, которые продолжают накапливаться и в настоящее время.

В программном комплексе Ing+2021 MicroFe была разработана конечно-элементная модель здания (рис. 2). Все материалы конструкций приняты изотропными, за исключением кирпичных стен и столбов, у которых материал принят ортотропным, где вертикальный модуль упругости кирпичной кладки принят в десять раз больше горизонтального модуля упругости, что хорошо коррелирует с принятой практикой расчета каменных конструкций.

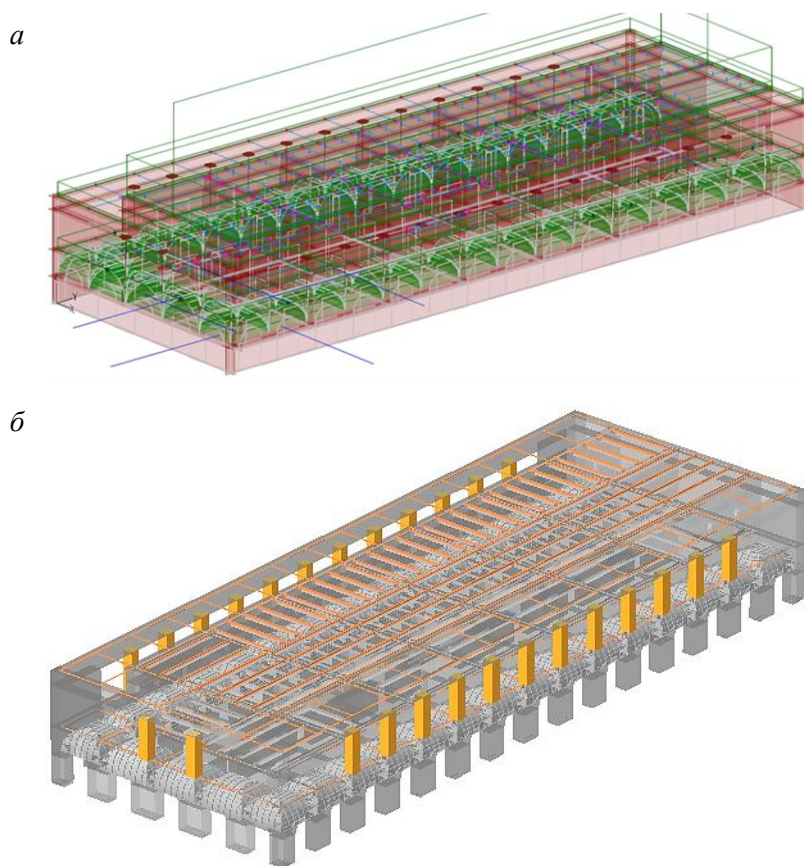


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель здания (а) и ее визуализация (б)
Fig. 2. Finite element model of the building (a) and its visualization (b)

Опираение кирпичных стен и столбов на ленточный бутовый фундамент принято шарнирно-неподвижным. Интегральное влияние на здание неравномерных перемещений бутового фундамента принято по фактически определенным осадкам стен и столбов (рис. 3), полученным из результатов наземного лазерного сканирования рассматриваемого здания.

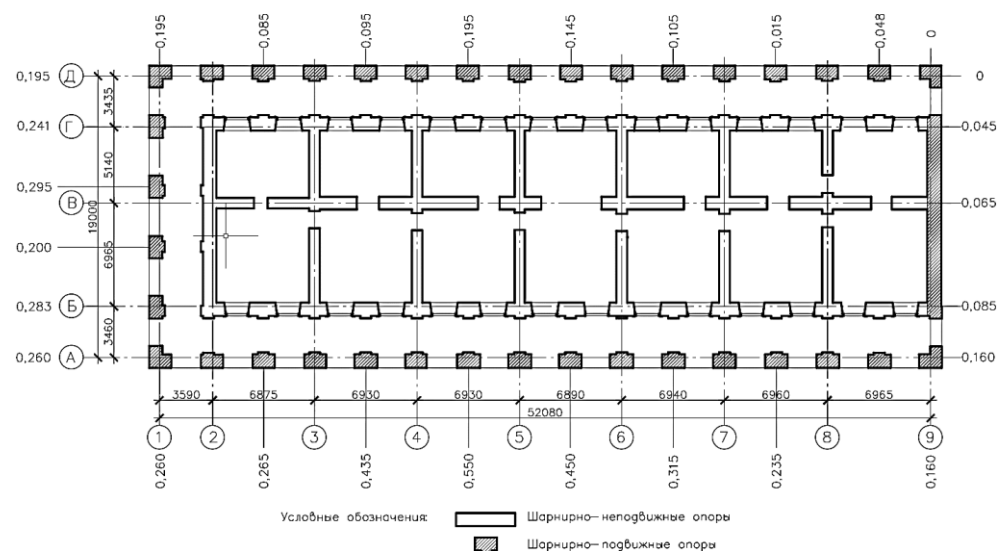


Рис. 3. Значения вертикальных перемещений по низу стен и столбов наружного контура галереи относительно внутреннего контура здания

Fig. 3. Vertical displacement at the bottom of walls and columns of the gallery outer contour relative to the inner contour of the building

Поверочный расчет стен и перекрытий выполнен в нелинейной постановке по теории предельных поверхностей [17]. Расчет стен в своей плоскости и плит из плоскости выполнен из условий, основанных на обобщенных уравнениях предельного равновесия.

Кладка стен, кирпича и колонн выполнена из красного глиняного кирпича, прочность которого соответствует марке М100, прочность известково-песчаного раствора кладки соответствует марке М10.

На основе разработанной расчетной модели были рассмотрены три расчетные схемы:

- расчетная схема № 1 с шарнирно-неподвижными опорами снизу стен и столбов. Эта расчетная схема отображает стабильное состояние фундамента здания, при котором отсутствуют неравномерные осадки основания;
- расчетная схема № 2 с шарнирно-подвижными опорами снизу стен и столбов. Данная расчетная схема принята для нестабильного состояния фундамента. В рассматриваемой расчетной схеме заданы вертикальные перемещения опор стен и столбов, полученные с помощью наземного лазерного сканирования здания;
- расчетная схема № 3 отличается от расчетной схемы № 2 тем, что задано усиление здания в виде предварительно напряженных стальных поясов

в уровне междуэтажного и чердачного перекрытий по наружному контуру здания. Величина необходимого предварительного напряжения стальных стержней диаметром 20 мм определялась расчетным путем и составила 100 кН.

В расчетной схеме № 1 результаты конструктивного расчета кирпичных наружных и внутренних стен приведены на рис. 4 и 5 соответственно. Как видно из рис. 4, несущая способность в локальных местах наружных стен не обеспечена, т. к. коэффициент использования по несущей способности $\text{Max } k = 1,16739 > 1$. В то же время несущая способность внутренних стен практически обеспечена, коэффициент использования по несущей способности $\text{Max } k = 1,00182$.

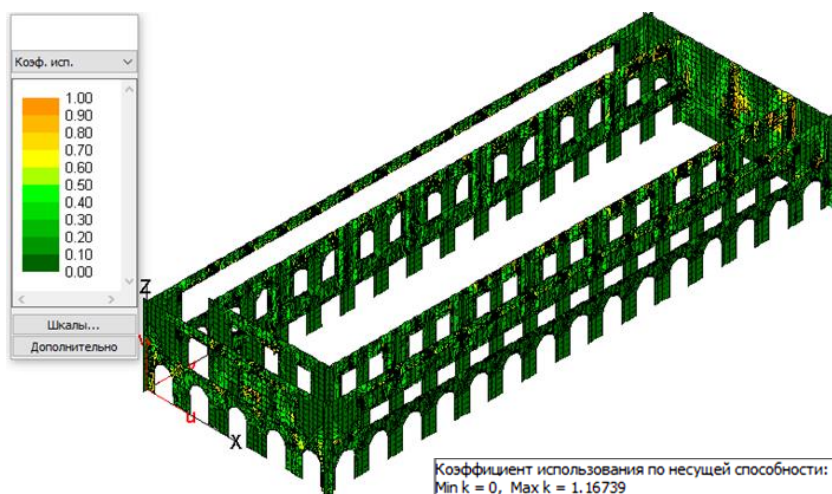


Рис. 4. Изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен в расчетной схеме № 1

Fig. 4. Utilization factor isofields of load-bearing capacity of outer walls in design model 1

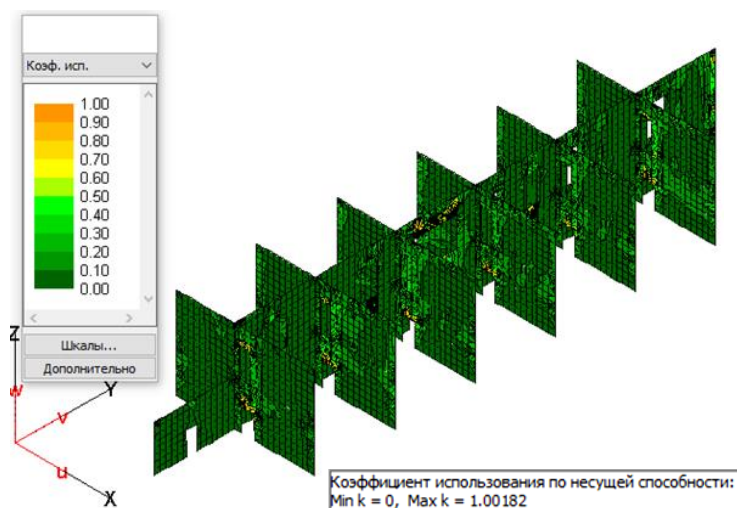


Рис. 5. Изополя коэффициента использования по несущей способности внутренних стен в расчетной схеме № 1

Fig. 5. Utilization factor isofields of load-bearing capacity of inner walls in design model 1

В расчетной схеме № 2 результаты конструктивного расчета кирпичных наружных и внутренних стен приведены на рис. 6 и 7 соответственно. Как видно из данных рис. 6, несущая способность в локальных местах наружных стен не обеспечена, коэффициент использования по несущей способности $\text{Max } k = 2,83698$. При этом несущая способность внутренних стен также не обеспечена, коэффициент использования по несущей способности $\text{Max } k = 1,4008$. Такие значения коэффициентов использования обусловлены существенными деформациями стен и столбов.

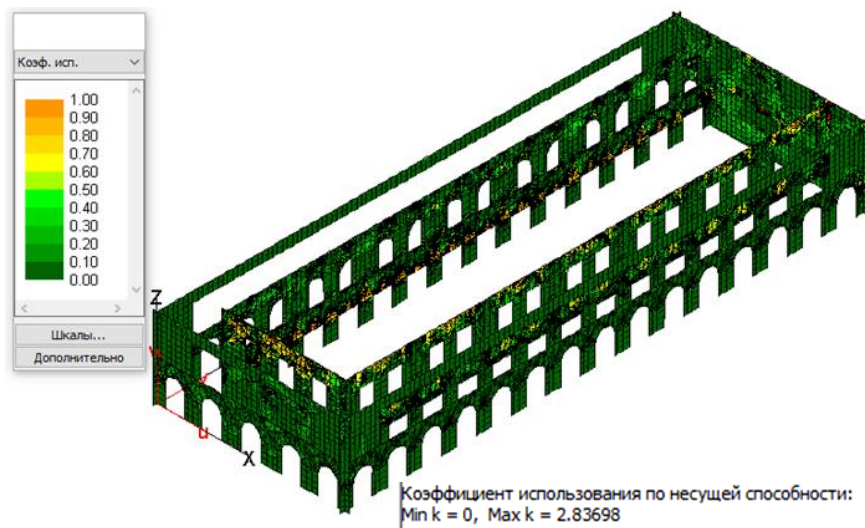


Рис. 6. Изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен в расчетной схеме № 2

Fig. 6. Utilization factor isofields of load-bearing capacity of outer walls in design model 2

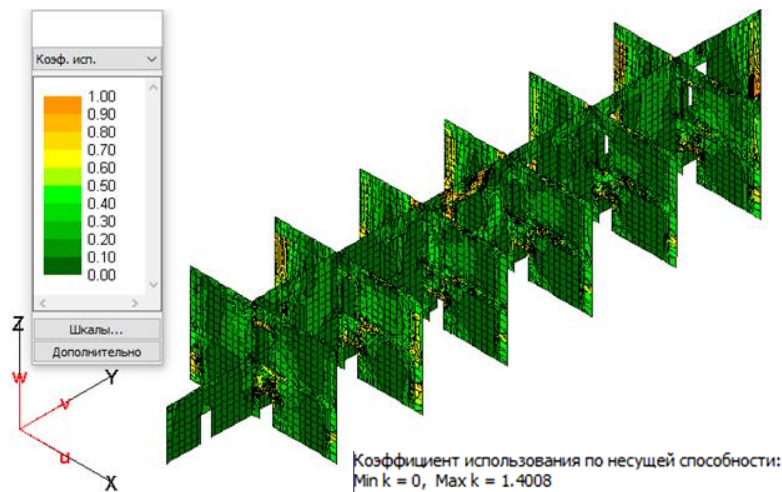


Рис. 7. Изополя коэффициента использования по несущей способности внутренних стен в расчетной схеме № 2

Fig. 7. Utilization factor isofields of load-bearing capacity of inner walls in design model 2

В расчетной схеме № 3 результаты конструктивного расчета кирпичных наружных и внутренних стен приведены на рис. 8 и 9 соответственно.

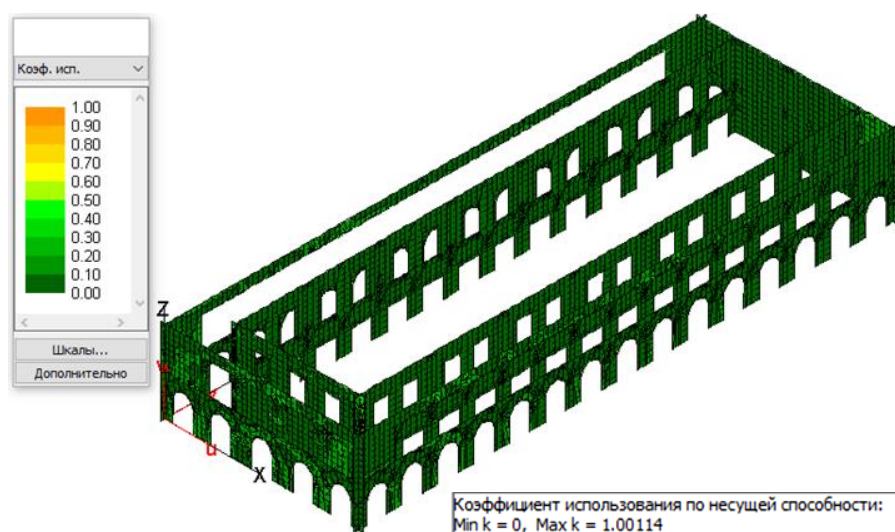


Рис. 8. Изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен в расчетной схеме № 3

Fig. 8. Utilization factor isofields of load-bearing capacity of outer walls in design model 3

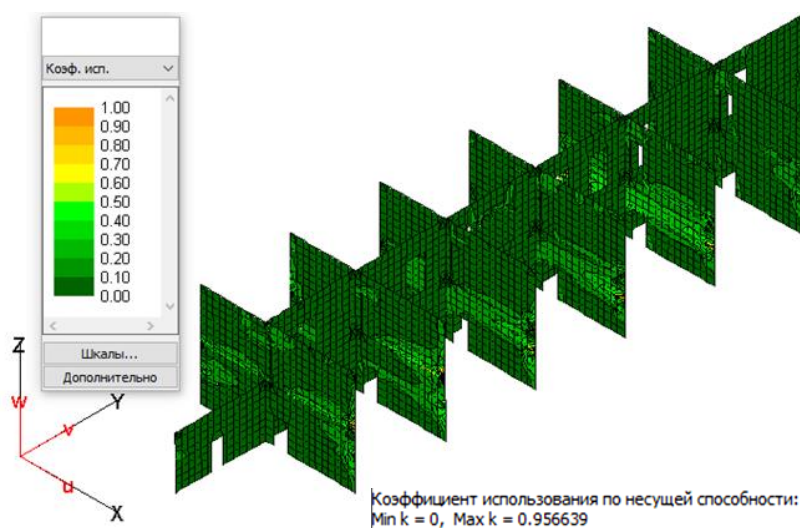


Рис. 9. Изополя коэффициента использования по несущей способности внутренних стен в расчетной схеме № 3

Fig. 9. Utilization factor isofields of load-bearing capacity of inner walls in design model 3

Как следует из данных рис. 8, несущая способность наружных стен в расчетной схеме № 3 обеспечена, коэффициент использования по несущей способности $\text{Max } k = 1,00114$. Также обеспечена несущая способность внут-

ренных стен в расчетной схеме № 3, где коэффициент использования по несущей способности $\text{Max } k = 0,956639$.

В заключение можно отметить, что расчетным путем обосновано усиление кирпичного здания, получившего значительные и неравномерные осадки, в виде предварительно напряженных стальных поясов в уровне междуэтажного и чердачного перекрытий по наружному контуру здания.

Основной целью контурной обвязки здания предварительно напряженными стальными стержнями является обеспечение пространственной жесткости и устойчивости вертикальных кирпичных стен и столбов, а также горизонтальных сталежелезобетонных перекрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Невзоров А.Л., Никитин А.В., Аксенов С.Е., Заручевных А.В. Конструктивные особенности исторических зданий в Архангельске // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 35–37.
2. Монастырский А.Е., Филиппов Б.П. Влияние состояния бутовых фундаментов на появление трещин в кирпичных стенах зданий // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 188–190.
3. Грановский А.В. Почему нормы по каменным конструкциям не способствуют развитию отрасли // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 12. С. 23–27.
4. Копаница Д.Г., Усеинов Э.С., Устинов А.М. Деформации и разрушение фрагмента каменной кладки при кратковременном действии сжимающей статической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 90–97.
5. Деркач В.Н., Белов В.В. Прочность каменной кладки на растяжение под углом к горизонтальным растворным швам // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2. С. 65–70.
6. Грановский А.В., Джамуев Б.К., Осипов П.В., Симаков О.А. Сейсмостойкость кирпичных зданий, усиленных композитными материалами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 4. С. 44–49.
7. Бедов А.И. Несущая способность элементов из каменной кладки, усиленных сталефибробетонными обоймами // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 45–50.
8. Ицук М.К., Ицук Е.М., Фролова И.Г. Совместная работа старой и новой кладок на участках с вычинкой // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 1. С. 28–30.
9. Тонких Г.П., Кабанцев О.В., Грановский А.В. и др. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки системой внешнего армирования на основе углеволокна // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6 (47). С. 57–59.
10. Курланов Д.В., Куваев А.С., Родионов А.В., Валеев Р.М. Инъектирование как метод усиления каменных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3. С. 17–21.
11. Грановский А.В., Сайфулина Н.Ю., Гасиев А.А. К оценке достоверности экспериментальных методов испытаний каменных конструкций на перекос // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 3. С. 31–35.
12. Ицук М.К., Ицук В.Л. Расчет каменных стен при сдвиге и растяжении // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 31–39.
13. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Результаты исследований каменных и армокаменных кладок // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 99–106.
14. Кабанцев О.В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 113–133.
15. Пономарев А.Б., Захаров А.В., Сазонова С.А., Калюшина С.В., Безгодов М.А., Шенкман Р.И., Золотозубов Д.Г. Геотехнический мониторинг жилого дома // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 41–45.

16. Юшубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А., Лобанов А.А., Лазарев В.М. Оценка надежности кирпичного здания на свайном фундаменте в условиях развития неравномерных осадок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 1. С. 202–215.
17. Семенов Д.А. Прочность железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5. С. 76–84.

REFERENCES

1. Nevzorov A.L., Nikitin A.V., Aksenov S.E., Zaruchevnykh A.V. Historical buildings in Arkhangelsk. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012; (10): 35–37. (In Russian)
2. Monastyrsky A.E., Filippov B.P. Rubble foundation influence on crack formation in brick buildings. *Vestnik MGSU*. 2006; (1): 188–190. (In Russian)
3. Granovsky A.V. Why norms for stone structures do not contribute to the industrial development. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (12): 23–27. (In Russian)
4. Kopanitsa D.G., Useinov E.S., Ustinov A.M. Deformation and fracture of masonry under compressive load. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (6): 90–97. (In Russian)
5. Derkach V.N., Belov V.V. Tensile strength of masonry at an angle to horizontal mortar joints. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012; (2): 65–70. (In Russian)
6. Granovsky A.V., Djamuev B.K., Osipov P.V., Simakov O.A. Seismic resistance of brick buildings reinforced with composite materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017; (4): 44–49. (In Russian)
7. Bedov A.I. Bearing capacity of masonry elements of steel fiber reinforced concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016; (7): 45–50. (In Russian)
8. Ishchuk M.K., Ishchuk E.M., Frolova I.G. Joint work of old and new masonry in curing areas. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014; (1): 28–30. (In Russian)
9. Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Granovsky A.V., et al. Experimental study of seismic retrofitting using externally bonded fiber reinforced polymers. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014; 6 (47): 57–59. (In Russian)
10. Kurlanov D.V., Kuvaev A.S., Rodionov A.V., Valeev R.M. Injection as a method of strengthening stone structures. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2009; (3): 17–21. (In Russian)
11. Granovsky A.V., Sayfullina N.Yu., Gassiev A.A. Reliability assessment of test methods of stone structures for warping. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (3): 31–35. (In Russian)
12. Ishchuk M.K., Ishchuk V.L. Shear and stretching analysis of stone walls. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; (8): 31–39. (In Russian)
13. Sokolov B.S., Antakov A.B. Masonry and reinforced masonry. *Vestnik MGSU*. 2014; (3): 99–106. (In Russian)
14. Kabantsev O.V. Discrete model of masonry under biaxial stresses. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (4): 113–133. (In Russian)
15. Ponomarev A.B., Zakharov A.V., Sazonova S.A., Kalyushina S.V., Bezgodov M.A., Shenkman R.I., Zolotozubov D.G. Geotechnical monitoring of residential building. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2015; (9): 41–45. (In Russian)
16. Yushube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A., Lobanov A.A., Lazarev V.M. Reliability of brick building on pile foundation in relative settlement conditions. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (1): 202–215. (In Russian)
17. Semenov D.A. Strength of reinforced concrete elements under oblique eccentric compression. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; (5): 76–84. (In Russian)

Сведения об авторах

Юшубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Тарасов Александр Александрович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

Бурмин Алексей Валерьевич, инженер, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, aburmin@bk.ru

Устюжанин Владимир Леонидович, инженер, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, uvl77@mail.ru

Authors Details

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sv@tsuab.ru

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodchivalov@list.ru

Aleksandr A. Tarasov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Soyanaaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tar.a.a@mail.ru

Aleksei V. Burmin, Engineer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Soyanaaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, aburmin@bk.ru

Vladimir I. Ustyuzhanin, Engineer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Soyanaaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, uvl77@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 20.04.2023
Одобрена после рецензирования 24.04.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 20.04.2023
Approved after review 24.04.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 189–198.

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 (4): 189–198.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.154

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-189-198

EDN: HADLDI

АНАЛИЗ ЗНАЧЕНИЙ УСИЛИЯ ВДАВЛИВАНИЯ СВАЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ, В СРАВНЕНИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО МЕТОДИКАМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

**Сергей Васильевич Ющубе, Александр Александрович Тарасов,
Артем Сергеевич Устюгов**

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

Аннотация. Исследованы усилия вдавливания свай в инженерно-геологических условиях г. Томска.

Актуальность. Метод вдавливания свай является одним из немногих, позволяющих погружать сваи заводского изготовления в условиях плотной городской застройки с большим количеством исторических зданий, что делает настоящую работу крайне актуальной для г. Томска и других аналогичных городов.

В статье приводятся результаты сопоставления усилий вдавливания свай, полученных экспериментальным путем на реальных строительных площадках г. Томска, с расчетными усилиями вдавливания, определенными по методикам нормативных документов.

Результаты исследований позволили оценить применимость указанных методик для инженерно-геологических условий г. Томска, а также выявить факторы, которые могут снизить их достоверность.

Практическая значимость. Даны рекомендации по выбору методики определения усилия вдавливания свай в зависимости от грунтовых условий площадки строительства.

Ключевые слова: усилие вдавливания, статическое вдавливание свай, водонасыщенные глинистые грунты

Для цитирования: Ющубе С.В., Тарасов А.А., Устюгов А.С. Анализ значений усилия вдавливания свай, полученных экспериментальным путем, в сравнении с результатами расчетов, выполненных по методикам нормативных документов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 189–198. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-189-198. EDN: HADLDI

ORIGINAL ARTICLE

COMPARISON OF EXPERIMENTAL PILE PENETRATION FORCE AND CALCULATED BY REGULATORY DOCUMENTS

Sergei V. Yushchube, Aleksandr A. Tarasov, Artem S. Ustyugov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The paper studies the pile penetration force in engineering and geological conditions of Tomsk. The pile penetration method allows piles to be penetrated in urban conditions with a large number of historical buildings, which makes this work extremely relevant for Tomsk and other cities.

The paper presents experimental data and theoretical calculations of the pile penetration in various districts of Tomsk. Theoretical calculations are based on several regulatory documents.

Research results allow assessing the applicability of the proposed methods to engineering and geological conditions of Tomsk as well as identifying factors reducing the reliability this method. Recommendations are given for selecting methods to determine the pile penetration force, depending on the soil conditions at the construction site.

Keywords: penetration force, static indentation, water-saturated clay soils

For citation: Yushchube S.V., Tarasov A.A., Ustyugov A.S. Comparison of experimental pile penetration force and calculated by regulatory documents. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (4): 189–198. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-189-198. EDN: HADLDI

Введение

Долгое время на территории г. Томска основным способом погружения свай являлась забивка дизель-молотами. В последнее время в связи с ужесточением требований к предельным динамическим воздействиям на окружающую застройку и инженерные коммуникации, а также развитием материально-технической базы, всё большее распространение стал получать способ погружения свай вдавливанием. Это обусловлено тем, что при применении статического вдавливания практически исключаются динамические воздействия на строительные конструкции, а также снижается шумовое воздействие, характерное для ударного и виброударного типа погружения, что отмечается в многочисленных работах известных отечественных [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9] и зарубежных [3] авторов.

Специфическим параметром, определяемым для данного способа погружения, является усилие вдавливания свай $F_{вд}$. В нормативной литературе $F_{вд}$ определяется через значение несущей способности свай F_d с применением определенных переводных коэффициентов:

$$F_{вд} = kF_d,$$

где k – коэффициент условий работы; F_d – несущая способность свай на различных глубинах ее погружения, кН.

Так, согласно СП 24.13330.2021 и СП 45.13330.2017, при назначении минимально необходимого усилия вдавливания, вне зависимости от грунтовых условий, несущую способность свай F_d следует умножать на коэффици-

ент условия работы, равный 1,2. РТМ 36.44.12,2-90 предписывает принимать предварительные значения ожидаемого максимального вдавливающего усилия с учетом коэффициента, равного 1,9 для песчаных и 1,4 для глинистых грунтов. ТСН 50-302-96 рекомендует при определении усилия вдавливания в глинистых грунтах в зависимости от показателя текучести I_L использовать коэффициент, изменяемый от 0,55 до 1,1.

Однако в научно-технической литературе практически отсутствуют данные об апробации существующих нормативных методик определения $F_{вд}$ с учетом особенностей региональных грунтовых условий, что сдерживает внедрение данного способа погружения свай в практику проектирования, а также снижает его эффективность при производстве работ.

В статье выполнено сопоставление экспериментальных данных $F_{вд}$, полученных на трех строительных площадках в г. Томске при массовом погружении свай, с результатами расчетов по различным нормативным документам.

Инженерно-геологические условия

Натурные экспериментальные исследования процесса вдавливания железобетонных призматических свай производились на трех площадках строительства, находящихся в различных частях г. Томска, сложенных преимущественно водонасыщенными глинистыми грунтами. На каждой из площадок был выполнен стандартный комплекс инженерно-геологических изысканий, включающий в том числе статическое зондирование грунтов.

На первой экспериментальной площадке были получены значения усилия вдавливания для 11 свай сечением 350×350 мм и длиной 8,0 м. Погружение происходило со дна котлована глубиной 5,5 м с абсолютной отметки +73,70 м до отметки +66,15 м. Площадка сложена глинами аллювиальными легкими тугопластичными (ИГЭ-2: $I_p = 18 \%$, $I_L = 0,37$, $E = 8,0$ МПа, $e = 0,85$, $\varphi = 17$, $C = 31$ кПа, $S_r = 0,96$), суглинками аллювиальными тяжелыми мягкопластичными (ИГЭ-3: $I_p = 16 \%$, $I_L = 0,61$, $E = 3$ МПа, $e = 0,86$, $\varphi = 16$, $C = 14$ кПа, $S_r = 0,96$), супесями аллювиальными текучими (ИГЭ-4: $I_p = 5 \%$, $I_L > 1$, $e = 0,73$, $\varphi = 21$, $C = 12$ кПа, $S_r = 0,90$), гравийными грунтами с песчаным заполнителем (ИГЭ-5: $E = 37,0$ МПа, $\varphi = 32$, $C = 5$ кПа). Инженерно-геологический разрез с посадкой свай приведен на рис. 1.

На второй площадке были получены значения усилия вдавливания для 154 свай сечением 300×300 мм и длиной 12 м. Сверху площадка перекрыта насыпными грунтами (tQIV) толщиной слоя 0,9–2,2 м. Насыпные грунты подстилаются серовато-коричневыми суглинками мягкопластичной консистенции с прослойками супесей, песков и включением органических веществ, общая мощность слоя – 1,5–2,3 м (ИГЭ-2: $I_p = 9 \%$, $I_L = 0,68$, $e = 0,69$, $S_r = 0,87$, $\varphi = 16$, $C = 18$ кПа). Ниже, на глубине 2,6–4,1 м от поверхности, а также на глубинах 7,2–7,9 м (в скв. 2, скв. 3) и на глубине 10,7–13,9 м залегают суглинки серые текучепластичной консистенции с прослойками песка пылеватого (ИГЭ-3: $I_p = 8 \%$, $I_L = 0,83$, $e = 0,66$, $S_r = 0,96$, $\varphi = 15$, $C = 16$ кПа). На глубине 4,0–5,6 м от поверхности залегают супеси серые текучей консистенции с прослойками (10–20 см) песка (ИГЭ-4: $I_p = 4 \%$, $I_L > 1$, $e = 0,64$, $S_r = 0,91$, $\varphi = 19$, $C = 12$ кПа). Начиная с глубины 11,5–16,7 м, текучепластичные суглин-

ки подстилаются тугопластичными (в кровле суглинка – мягкопластичными) (ИГЭ-5: $I_p = 11\%$, $I_L = 0,43$, $e = 0,74$, $S_r = 0,91$, $\varphi = 19$, $C = 26$ кПа). Основанием тугопластичных суглинков являются гравийно-песчаные грунты, залегающие, начиная с глубины 15,7–18,6 м (ИГЭ-6: $R_0 = 300\text{--}500$ кПа). Инженерно-геологический разрез с посадкой свай приведен на рис. 2.

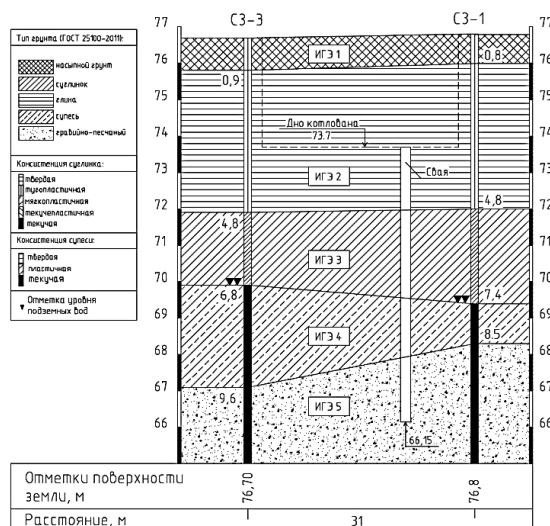
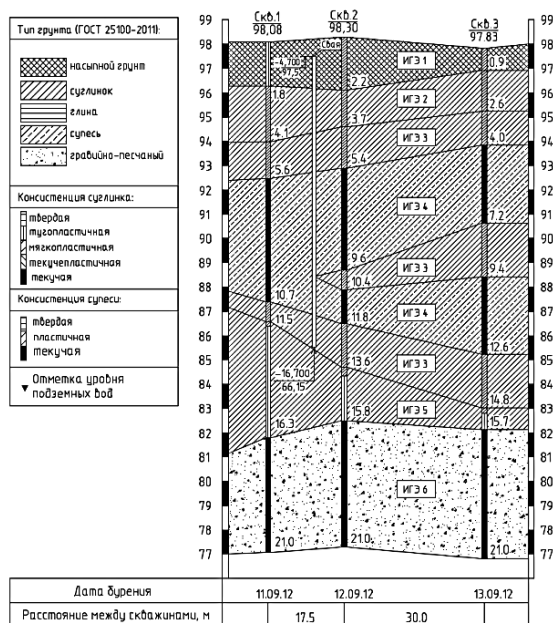


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез первой экспериментальной площадки
Fig. 1. Engineering and geological section of the first experimental site



На третьей площадке были получены значения усилия вдавливания для 37 свай сечением 300×300 мм и длиной 12,0 м. В инженерно-геологическом разрезе площадки выделено 4 инженерно-геологических элемента (ИГЭ). ИГЭ-1 – суглинок насыпной тяжелой мягкопластичной консистенции с включениями строительного мусора до 30 %. Грунты ИГЭ-1 распространены по всей площадке с поверхности до глубины 2,1–2,6 м ($I_p = 13 \%$, $I_L = 0,57$, $e = 0,80$, $S_r = 0,93$, $R_0 = 150$ кПа). ИГЭ-2 – супесь аллювиальная текучей консистенции. Грунты ИГЭ-2 залегают, начиная с глубины 2,1–2,6 м, до глубины 4,0–4,3 м, имеют мощность 1,7–1,9 м ($I_p = 6 \%$, $I_L > 1$, $e = 0,64$, $S_r = 0,91$, $\varphi = 18$, $C = 16$ кПа). ИГЭ-3 – суглинок аллювиальный тяжелый мягкопластичной консистенции. Грунты ИГЭ-3 залегают, начиная с глубины 4,0–4,3 м, до глубины 9,2–9,6 м, имеют мощность 5,1–5,3 м ($I_p = 15 \%$, $I_L = 0,64$, $e = 0,86$, $S_r = 1$, $\varphi = 18$, $C = 19$ кПа). ИГЭ-4 – суглинок аллювиальный тяжелый тугопластичной консистенции с примесью органических веществ (5,4 %). Грунты ИГЭ-4 залегают, начиная с глубины 9,2–9,6 м, по слою пройдено 7,4–7,8 м ($I_p = 15 \%$, $I_L = 0,34$, $e = 0,64$, $S_r = 0,96$, $\varphi = 20$, $C = 23$ кПа). Инженерно-геологический разрез с посадкой свай приведен на рис. 3.

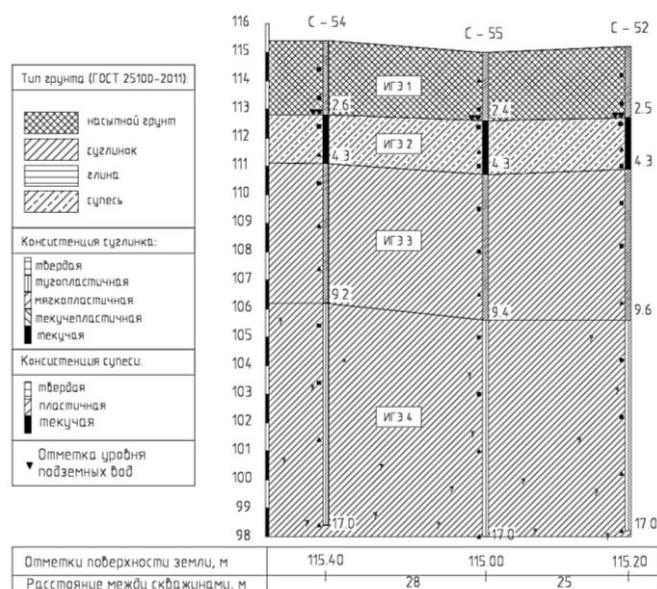


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез третьей экспериментальной площадки

Fig. 3. Engineering and geological section of the third experimental site

Результаты экспериментальных исследований

Погружение свай на проектную отметку осуществлялось гидравлической сваевдавливающей установкой со средней скоростью погружения $V_{вд} = 2,4\text{--}4$ м/мин. Измерение усилия вдавливания $F_{вд}$ производилось во время всего процесса погружения свай с регистрацией значений через каждые 40 см. Регистрация велась посредством штатного оборудования, встроенного в гид-

равлическую систему сваевдавливающей установки. Оборудование предварительно тарировалось. После проведения эксперимента полученные данные подвергались статистической обработке.

Затем для каждой площадки были построены графики изменения с глубиной погружения усилия вдавливания $F_{вд}$ свай по результатам экспериментальных исследований и расчетов по методикам нормативных документов СП 24.13330.2021, СП 45.13330.2017, РТМ 36.44.12,2-90, ТСН 50-302-96 (рис. 4–6). При проведении расчетов несущая способность свай определялась по результатам статического зондирования грунтов.

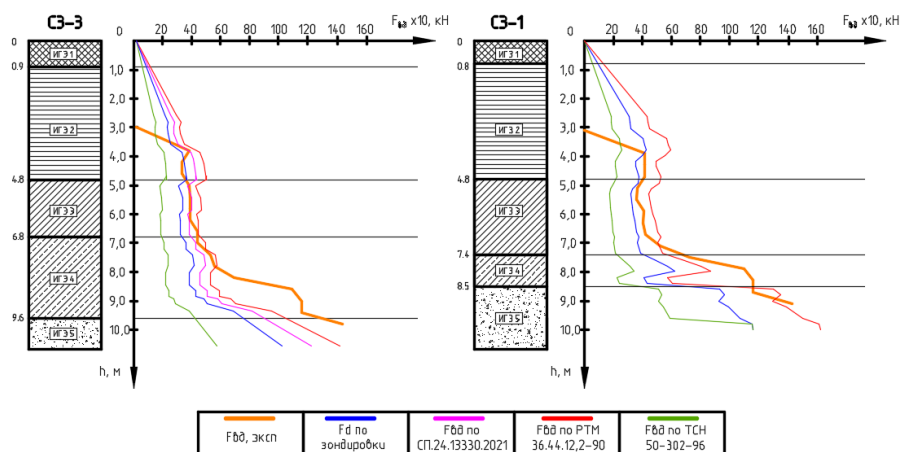


Рис. 4. Сопоставление графиков значений экспериментального и расчетного усилия вдавливания на первой площадке

Fig. 4. Experimental and theoretical pile penetration force on the first experimental site

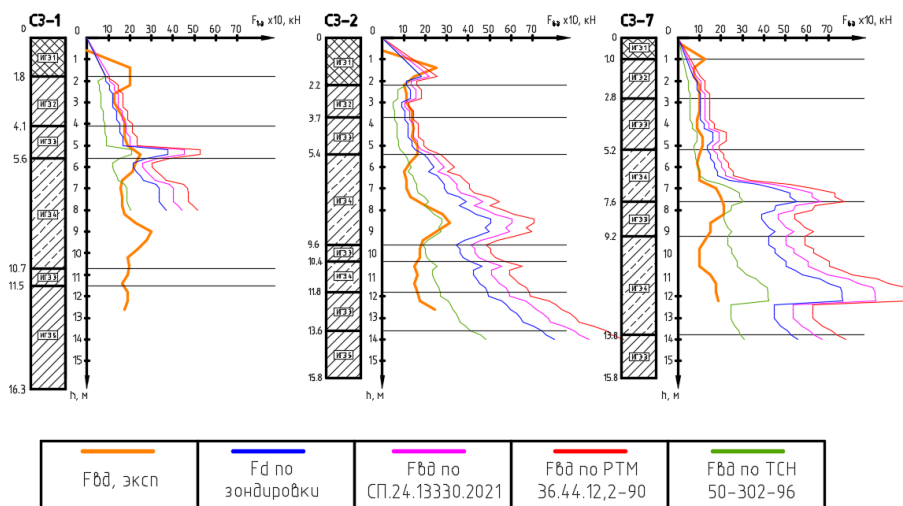


Рис. 5. Сопоставление графиков значений экспериментального и расчетного усилия вдавливания на второй площадке

Fig. 5. Experimental and theoretical pile penetration force on the second experimental site

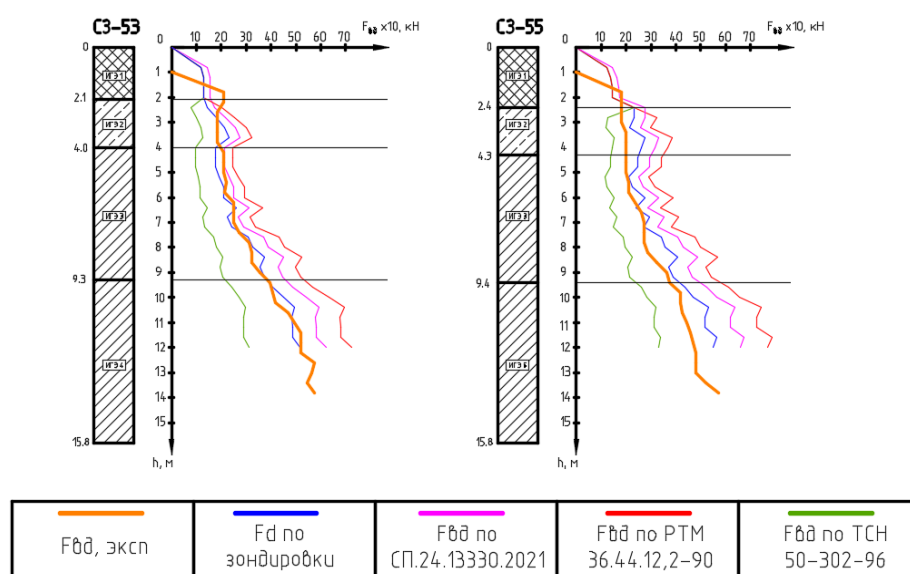


Рис. 6. Сопоставление графиков значений экспериментального и расчетного усилия вдавливания на третьей площадке

Fig. 6. Experimental and theoretical pile penetration force on the third experimental site

Сопоставление графиков и их дальнейший анализ показали, что сходимость экспериментальных и расчетных данных напрямую зависит от глубины, характера напластования и состояния грунтов. Выявлено, что хорошая сходимость экспериментальных и расчетных данных наблюдается только на небольших глубинах погружения (до 3,2–6,8 м). С ростом глубины точность расчетных методов снижается, отклоняясь от экспериментальных значений как в большую (до 300 %), так и меньшую (до 80 %) сторону.

Так, на первой площадке при приближении нижнего конца сваи к супесям аллювиальным текучим (ИГЭ-4) был зафиксирован резкий рост усилия вдавливания, значительно обгоняющий изменения расчетных значений (рис. 4). Данное явление, вероятно, связано с возникновением под острием сваи переуплотненного грунтового ядра и его взаимодействием с жестким основанием в виде песчано-гравийного слоя. На графике статического зондирования грунтов данный эффект также был зафиксирован. Однако ввиду малого поперечного сечения зонда влияние жесткого основания (ИГЭ-5), очевидно, проявляется не так явно и только при большем приближении зонда в ИГЭ-5.

На второй площадке начало значительного расхождения графиков было зафиксировано на глубине 3,5–5 м от дневной поверхности земли. С ростом глубины расхождение между экспериментальными и расчетными значениями $F_{вд}$ увеличивалось. Такой эффект может быть объяснен высокой степенью водонасыщения грунтов, прорезаемых свай, и последующим формированием «водной пленки» между грунтом и свай, минимизирующей сопротивление грунта по ее боковой поверхности. Данное предположение основывается на анализе графиков изменения усилия вдавливания по глубине. Из данных рис. 5 видно, что с увеличением глубины погружения сваи рост $F_{вд}$ практически не происходит, что мож-

но объяснить только отсутствием значимого трения по боковой поверхности свай. Также стоит отметить, что на глубинах 7–10 м при прохождении супесей текучих (ИГЭ-4) как для свай, так и для зондов был зафиксирован скачок значений усилия вдавливания, предположительно вызванный возникновением грунтового ядра, аналогично наблюдаемому на площадке 1.

Третья площадка, в отличие от двух других, имеет более однородное напластование грунтов, представленных в основном суглинками мягко-тугопластичными. Анализ графиков экспериментального значения $F_{вд}$ показал, что оно равномерно растет с глубиной без значительных скачков и провалов (рис. 6). Стоит отметить, что графики усилия вдавливания, полученные на основе нормативных документов, все же несколько опережали натурные результаты, но по сравнению с первой и второй площадкой были максимально к ним приближены.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований, выполненных на реальных строительных площадках, расположенных в различных районах г. Томска, и на основе их сопоставления с результатами расчетов по нормативным документам можно сделать следующие выводы и дать соответствующие и рекомендации:

1. Для всех площадок на небольших глубинах погружения до 3,2–6,8 м наблюдается хорошая сходимость экспериментальных и расчетных данных. Исключение составляет ТСН 50-302-96, который в инженерно-геологических условиях г. Томска, начиная уже с глубины 2,0–3,0 м, дает заниженные по сравнению с фактическими значения усилия вдавливания свай. Использование ТСН 50-302-96 для определения усилия вдавливания свай длиной до 6,0 м в инженерно-геологических условиях г. Томска не рекомендуется.

2. Выявлено, что с ростом глубины погружения свай точность определения усилия вдавливания по всем рассмотренным методикам снижается с отклонениями от экспериментальных значений как в большую (до 300 %), так и в меньшую (до 80 %) сторону. При этом установлено, что на величину усилия вдавливания существенное влияние оказывает не только вид и состояние грунтов, но и характер их переслаивания относительно друг друга. Наибольшая сходимость экспериментальных и расчетных данных наблюдается в однородных грунтах, сложенных мягкотугопластичными суглинками. При этом предпочтение в таких грунтах следует отдавать методике СП 24.13330, использование которой позволяет получить расчётные значения усилия вдавливания с минимальными коэффициентами запаса.

3. Установлено, что при прохождении сваями супесей наблюдается резкий рост усилия вдавливания, что, вероятно, связано с формированием в них уплотненного грунтового ядра под нижними концами свай. При наличии жесткого подстилающего основания рост усилия вдавливания в таких грунтах ещё более существенен. В грунтовых условиях с жесткими подстилающими основаниями все рассмотренные выше методики показали значительное занижение расчетных значений по сравнению с фактическими, что может не позволить погрузить сваи на проектные отметки при производстве свайных работ на площадках, сложенных аналогичными грунтами.

4. Выявлено, что при погружении свай в водонасыщенные глинистые грунты текучепластичных – текучих консистенций рост усилия вдавливания с глубиной практически не происходит, что указывает на отсутствие значимых сил трения по боковой поверхности свай. Данный эффект можно объяснить формированием на контакте «свая-грунт» «водной пленки», играющей роль смазки и минимизирующей влияние сопротивления свай по боковой поверхности на величину усилия вдавливания. В таких грунтовых условиях на глубинах более 6,0 м наибольшая сходимости отмечена у ТСН 50-302-96. При этом на меньших глубинах данная методика также малоприменима.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что сегодня единой методики, позволяющей надежно определять усилие вдавливания свай в различных грунтовых условиях с учётом вида, состояния и взаимного напластования грунтов, не разработано. Процессы, происходящие в грунтах при погружении свай вдавливанием, малоизученны и требуют проведения дальнейших исследований. Сделанные в данной статье предположения о формировании переуплотненных грунтовых ядер и «водных пленок» являются на данный момент гипотезами, основанными на результатах многолетних наблюдений за погружением свай в грунтовых условиях г. Томска, и требуют экспериментально-теоретического обоснования в дальнейшем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахолдин Б.В., Перлей Е.М., Светинский Е.В. Исследование процесса погружения свай вдавливанием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1997. № 3. С. 25–27.
2. Литвин О.В. Технология погружения свай вдавливанием с помощью установки с вакуумным анкером : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 1991. 20 с.
3. Фрейдман Б.Г. Совершенствование технологии вдавливания свай и шпунта в условиях плотной застройки : специальность 05.23.08 «Технология и организация строительства» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2002. 22 с.
4. Швецов В.М., Ибрагимов Р.К. О назначении усилия вдавливания свай // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 8. С. 129–131.
5. Нестеров А.С. Обоснование конструктивно-технологических параметров оборудования для погружения свай методом вдавливания: с применением анкерного устройства : специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные подъемно-транспортные машины» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 2008. 21 с.
6. Буров В.П. Исследование процесса погружения свай методом вдавливания с целью обоснования выбора оптимальных параметров сваявдавливающих установок : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 1969. 21 с.
7. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий / ВНИИТПИ. Москва, 2000. 316 с.
8. Полищук А.И., Тарасов А.А., Петухов А.А. Определение усилия вдавливания инъектора инъекционных свай в глинистых грунтах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 346–354.
9. Савинов А.В. Применение свай, погружаемых вдавливанием, при реконструкции исторической застройки городов : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Саратов, 2008.

REFERENCES

1. Bakholdin B.V., Perley E.M., Svehinskiy E.V. The pile penetration process. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov*. 1997; (3): 25–27. (In Russian)
2. Litvin O.V. Pile penetration with a vacuum anchor system. PhD Thesis. Kiev, 1991. P. 20 (In Russian)
3. Freidman B.G. Improvement of pile penetration technology in compact planning. PhD Abstract. Saint-Petersburg, 2002. 22 p. (In Russian)
4. Shvetsov V.M., Ibragimov R.K. Setting the pile driving force. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2004; (8): 129–131. (In Russian)
5. Nesterov A.S. Design and technological parameters of equipment for pile driving by indentation method using anchor device. PhD Abstract. Omsk, 2008. 21 p. (In Russian)
6. Burov V.P. Pile driving by indentation method to select optimum parameters of pile driving units. PhD Abstract. Omsk, 1969. 21 p. (In Russian)
7. Konovalov P.A. Foundations of reconstructed buildings. Moscow, 2000, 316 p. (In Russian)
8. Polishchuk A.I., Tarasov A.A., Petukhov A.A. Indentation force of pile injection in clayey soils. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; (2): 346–354. (In Russian)
9. Savinov A. V. Indentation piles in reconstruction of historic urban planning. DSc Thesis. Saratov, 2008 (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 11.04.2023
Одобрена после рецензирования 17.04.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 11.04.2023
Approved after review 17.04.2023
Accepted for publication 16.06.2023

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. № 4. С. 199–210.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 199–210.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.07:624.154-048.24

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-199-210

EDN: TFZAIP

О НАДЕЖНОСТИ ШТАМПОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ГРУНТУ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА ОПОР МОСТОВ

**Владимир Михайлович Картопольцев¹,
Андрей Владимирович Картопольцев¹,
Александр Аверьянович Алексеев²**

¹ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Требования на проведение штамповых испытаний по грунту под острием буронабивных свай обосновываются нормативно-техническим регламентом на возведение свайных фундаментов опор мостов. В научных публикациях отсутствует информация оценки надежности испытаний. Фундаменты опор мостов являются элементами мостовых сооружений и относятся к стратегическим и экономически ответственным объектам транспортной инфраструктуры территории РФ, поэтому должны обладать высоким уровнем надежности как на стадии проектирования, так и эксплуатации.

Цель. Практическое применение теории надежности для штамповых испытаний для обеспечения контроля строительства и экономических затрат. Вероятностный подход в обеспечении надежности штамповых испытаний обусловлен факторами случайной

природы характеристик напряженно-деформированного состояния грунтов под острием буронабивной сваи, их вероятностью безотказной работы.

Результаты. Рассмотрены примеры плотности распределения вероятности отказов в функции времени, допускающие некоторые ограничения в виде этапов и времени нагружения без снижения достоверности результатов испытаний, и возможность использования реальной экспериментальной зависимости «нагрузка – осадка» для обоснования программных требований и экономической целесообразности проведения работ.

Ключевые слова: мост, опора, грунт, штамп, надежность, испытания, прочность, долговечность, сваи

Для цитирования: Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. О надежности штамповых испытаний по грунту при возведении свайного фундамента опор мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 199–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-199-210. EDN: TFZAIP

ORIGINAL ARTICLE

RELIABILITY OF PLATE-BEARING TESTS OF PILE FOUNDATIONS FOR BRIDGE ABUTMENTS

Vladimir M. Kartopoltsev¹, Audrey V. Kartopoltsev¹,
Aleksandr A. Alekseev²

¹ООО “DIAMOS”, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The requirements for the plate-bearing test of bore piles are determined by technical regulations for the construction of pile foundations for bridge abutments. There is no information about the plate-bearing test reliability in the literature. Bridge pile foundations as bridge elements relate to strategic and economically responsible objects of the transport infrastructure in the Russian Federation and must have a high reliability level at the design stage and operation.

Purpose: Practical application of the reliability theory for plate-bearing tests to ensure control for construction and economic expenditures.

Approach: The probabilistic approach in providing plate-bearing test reliability is conditioned by a random nature of the stress-strain state of soil under the bore pile tip and nonfailure operating probability.

Research findings: Probability density functions allow restrictions such as loading stages and time without the reliability reduction of plate-bearing tests and the possibility of using the experimental load–soil settlement relation to substantiate the program requirements and economic feasibility of works.

Keywords: bridge, plate-bearing test, bridge abutment, soil, reliability, strength, durability, bore pile

For citation: Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Alekseev A.A. Reliability of plate-bearing tests of pile foundations for bridge abutments. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 199–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-199-210. EDN: TFZAIP

Формирование режима испытания и сокращение числа испытаний могут быть осуществлены за счет форсирования режима работы. Очевидно, что

это становится возможным, если изучен характер деформирования грунтового массива под подошвой штампа, а длительность испытания (выдержки) можно сократить со времени t до времени t_0 за счет форсирования режима, исходя из условия $t_\phi = t/k_y$, где $k_y = \bar{t} / \bar{t}_\phi$ – коэффициент ускорения; $\bar{t}$, $\bar{t}_\phi$ – средние показатели до отказа в нормальном и форсированном режимах.

Форсирование режима испытания можно также достигнуть, исключая промежуточные отказы, заранее известные по своим зависимостям и показателям. Для подтверждения одной и той же нижней границы P_u отказа с доверительной вероятностью α требуется провести меньше испытаний при выполнении условия [1]:

$$P^T = 1 - m/n, \quad (1)$$

где m – число отказов за весь цикл испытаний; n – число испытаний, результаты которых подтверждены и характеризуются доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, которое рекомендуется определять по формуле $n = \frac{\lg(1-\alpha)}{\lg P^H}$ при

$P^H = 0,9$, $\alpha = 0,95$, $n = 0,9$. Таким образом, для подтверждения нижней границы P^H средней величины отказа требуется меньшее количество испытаний, чем это заложено в программе.

Учитывая экспоненциальное распределение результатов испытаний, в частности, параболическое во времени, число нагружений становится обратно пропорциональным времени испытания. Принимаем результаты испытаний, полученных по экспоненциальной зависимости за счет увеличения их длительности, в качестве показателя надежности. Целесообразность сокращения всего объема испытаний основывается на использовании зависимости закона Вейбулла:

$$P = e^{-(t/t_0)^M}, \quad (2)$$

где t , t_0 – средние значения результатов двух последних нагружений; M – параметр формы зависимости, отображающей закон распределения значений; P – квантиль формы, отображающей зависимость между нагрузкой и осадкой (отказ), который определяется [2] из выражения $P = \frac{t-t_0}{V \cdot t_0} + U_p \frac{t}{t_0}$; U_p – пара-

метр, соответствующий среднему значению доверительного интервала при вариации значений, равных 0,95; $V = S_t/t$ – коэффициент вариации ряда полученных значений при $t = 3t_0$; $S_t \approx 0,3$. Следовательно, $\alpha = 0,8$ при $m = 0$, $n = 9$, $U_p = 0,95$. За счет увеличения времени этапа испытания объем испытания сокращается на два этапа.

Проверку фактического уровня надежности штамповых испытаний по заданной программе можно проводить, используя одноступенчатый контроль [3]. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при определении затраченного времени этапа нагружения и всего объема по средней величине, и в соответствии с показателем надежности испытания выясняются обстоятельства дальнейшего его проведения или прекращения. В программе назначается число

нагружений n , время t испытания каждого этапа при количестве отказов $m = 0$. Исходными данными для этих параметров являются риск испытаний α^* , риск нагружения β^* и полученное значение осадки (отказа). Величины α^* и β^* назначаются от 0,05 до 0,2 включительно, в зависимости от риска этапа испытания, чаще всего $\alpha^* = \beta^*$. Процесс контроля проводится по данным, полученным из выражений:

$$\left. \begin{aligned} 1 - \alpha^* &= \sum_{i=0}^m \frac{n \cdot t}{i \cdot t(n-i)t} (1 - P_{\alpha}(t))^i P_{\alpha}(t)^{n-i} \\ \beta^* &= \sum_{i=0}^m \frac{n \cdot t}{i \cdot t(n-i)t} (1 - P_{\beta^*}(t))^i P_{\beta^*}(t)^{n-i} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $1 - \alpha^*$ – выражение для анализа значений, которые заложены в программе испытания; β^* – нормативные значения.

Если режим работы соответствует программе при n и m , то при одноступенчатом режиме контроля $\alpha^* \simeq \beta^*$, что соответствует зависимости « $P - \Delta$ ». Контроль среднего времени ожидания в процессе этапа нагружения должен соответствовать техническим условиям $T_{\alpha^*} T_{\beta^*}$. Однако в процессе одноступенчатого контроля справедлива зависимость $T_{\beta^* \alpha^*} = 0,5$, а $T_{\alpha^*} T_{\beta^*}$ определяется из выражения

$$\frac{T_{\beta^* \alpha^*}}{T_{\alpha^* \beta^*}} = \frac{\chi_{1-\alpha^*}^2 \cdot 2m}{\chi_{\beta^*}^2 \cdot 2n}, \quad (4)$$

где $\chi_{\beta^*}^2 \cdot 2m$, $\chi_{1-\alpha^*}^2 \cdot 2m$ – квантили уровней надежности β^* и $1 - \alpha^*$ при заданных n и m . Затем по формуле $\frac{t_{\max}}{T_{\alpha^* \beta^*}} = \frac{1}{2} \chi_{1-\alpha^*}^2 \cdot 2m$ вычисляем среднее время

ожидания, необходимое для проведения контроля.

Среднее время ожидания считается удовлетворительным, если $t_{\max}$ достаточно для проведения контроля при измененных n и m . Для штамповых испытаний на мостовом сооружении в Томской области получены следующие значения:

α^*	β^*	$T_{\alpha^*} / T_{\beta^*}$	m	$\frac{t_{\max}}{T_{\beta^*}}$
0,1	0,1	0,8	8	0,15 ч
0,2	0,2		6	0,15 ч

Общеизвестно, что штамповые испытания по грунту относятся к экстремальным экспериментам. Поэтому для контроля и анализа в процессе испытания целесообразно применять метод крутого восхождения, известный как

интерполяционный эксперимент. В связи с тем, что число нагружений не велико (≤ 10), полинома первого порядка достаточно для описания небольшого участка экспоненциальной параболической формы зависимости « $P - \Delta$ ». Вектор-градиент полинома (функции отклика на давление от штампа) определяет короткий (крутой) путь к экстремуму. Совпадения и незначительные отличия двух соседних результатов эксперимента означают окончание интерполяционного эксперимента с достаточно высокой степенью точности. Для этого вычисляем экспериментальные значения Кохрена в виде отношения максимальной величины $S_{\max}^2$ осадки из n нагружений к сумме всех значений:

$$S_Q = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^n S_n^2}. \quad (5)$$

Однородность полученных зависимых значений осадок во время испытания подтверждается, если значение S_Q не превышает критического отклонения в зависимости от величин m, n, P, V, k . В нашем случае $S_Q \cong 0,57$, $S_Q = 0,768$, $S_Q > G_i$. Адекватность проведенных штамповых испытаний и реальной работы сваи в фундаменте опор оценивается отношением дисперсии нагружения к повторяемости с использованием критерия Бартлетта.

Оценивая состояние свайного поля в строящейся опоре мостового сооружения как нормальное по сравнению с проектным и типовым, можно отметить некоторые расхождения по признакам вероятностного состояния объекта. Вероятность k возможного возникновения признаков отступления от нормативного состояния характеризуется параметрами Байеса [4]:

$$P(D_i / k) = P(D_i) \frac{P(k) D_i}{P(k)}, \quad (6)$$

где $P(D_i)$ – нормальное состояние D_i объекта испытания; $P(k) D_i$ – вероятность появления отступлений от нормального состояния D_i ; $P(D_i) / k$ – конечное прогнозируемое состояние k с отступлением от нормативного по всем признакам. При $P(k) = \sum_1^n P(D_j) P(k_i, D_j)$ получаем параметры Байеса в виде

$$P(D_i / k) = \frac{P(D_i) P(k) / D_i}{\sum_1^n P(D_j) P(k) / D_j}. \quad (7)$$

Если в полученном состоянии D_i этапа испытания или нагружения выявлены явные признаки отступления от нормального $k_1, k_2 \dots k_n$, то в формуле Байеса вместо $P(k_1 / D_i) P(k_2 / D_i)$ подставляются $P(k_1, k_2 \dots k_n / D_i) = P(k_1 / D_i) \times P(k_2 / D_i k_1) \dots \times P(k_3 / D_i k_2) \dots P(k_n / D_i k_{n-1})$.

Рассмотрим следующий пример. Штамповые испытания по грунту содержат 10 этапов нагружения с количеством n снятия показаний прогибомера о величине осадки. Для грунта испытываемой сваи рассмотрим состояния $n = 3$. Среди них:

1. Подготовка грунтового основания подошвы штампа в свае оболочки.
 2. Возможные отклонения характеристик грунта под подошвой штампа в свае оболочке по отношению к результатам проектных инженерно-гидрогеологических изысканий, в т. ч. технических.

3. Форс-мажорные изменения условий штамповых испытаний включают возможное замачивание грунта в свае-оболочке [4].

В состоянии D_1 , D_2 и D_3 признак k_1 наблюдается соответственно в 10 % случаев ($P_1(k_1 / D_1) = 0,1$), признак k_2 – в 20 % случаев ($P\left(\frac{k_1}{D_2}\right) = 0,2$) и признак k_3 – в 40 % случаев ($P_1(k_2 / D_3) = 0,4$). Условия вероятности определяются по табл. 1

Таблица 1

Условия вероятности

Table 1

Probability conditions

Случай	D_1	D_2	D_3
1. Признаки k_1 , k_2 , k_3 отсутствуют	0,02	0,03	0,7
2. Признаки k_1 и k_2 присутствуют, а k_3 отсутствует	0,07	0,6	0,2
3. Признаки k_1 и k_2 отсутствуют, k_3 присутствует	0,12	0,46	0,37

Таким образом, в первом случае наблюдается состояние 3 с вероятностью 0,7, во втором случае – состояние 2 с вероятностью 0,6 и в третьем случае – состояния 1 и 2 вероятны почти в равной степени.

При проведении штамповых испытаний по грунту под острием буронабивных свай на объекте нередко возникает ситуационная необходимость в определении надежности эксперимента без каких-либо предположений относительно плотности вероятности возможных отказов на планируемом отрезке времени при коэффициенте доверия 90 %. Такие испытания относятся к непараметрическим с использованием функции F распределения вида

$$R(t) = \frac{1}{1 + \frac{f+1}{n-f} F_{\alpha} \gamma_2 \gamma_1}, \quad (8)$$

где $R(t)$ – надежность испытания с коэффициентом доверия 90 %; f – число полученных отказов; n – число нагружений при заданной длительности;

$F_{\alpha}\gamma_2\gamma_1$ – параметры функции распределения F , принимаются по табл. 5.4 [5, 6] при $(1-\alpha) = \gamma_2 = 2f + 2$, $\gamma_1 = 2n - 2f$.

Например, при 12 нагружениях наблюдалось 2 отказа. Тогда уровень надежности $\Theta = \frac{10}{12} = 0,85$. Нижний доверительный предел при коэффициенте доверия $< 90\%$ будет $\Theta = 0,8$. Тогда при $f = 2$ и $n = 12$ имеем

$$R(t) = \frac{1}{1 + \frac{2+1}{12-2} F_{10\%} 10,32} = 0,6.$$

Таким образом, на 90 % можно быть уверенным в том, что надежность испытания превышает значения 0,6 (60 %). В случае большого количества (≥ 50) испытаний, в которых $k = 4$, произошли отказы (состояние обжатия грунта под подошвой штампа).

Расчет ведется следующим образом. При вариации отказов $\gamma_1 = 0,0004$ с доверительной вероятностью $\gamma_2 = 0,95$ следует, что функционал вероятности безотказной работы $R \leq \gamma_2 \cdot 0,95 \cdot \gamma_1 = 0,00058$, а с вероятностью 0,99 – $R \leq \gamma_2 \cdot 0,99 \cdot \gamma_1 = 0,00066$. Доверительный коэффициент испытания составляет 0,90. Тогда надежность результатов штамповых испытаний остальных 46 образцов грунта под подошвой штампа после обжатия имеет доверительную надежность 0,9, что является приемлемым. Делаем следующий вывод: число нагружений образца достаточно, чтобы условия испытания полностью соответствовали реальным условиям нагружения, в то же время штамповые испытания соответствуют по времени определяющим параметрам непрерывного контроля, при которых кривая ухода параметров испытания, по которой оценивается достоверность этапа, соответствует заданным в программе.

Рассматривая штамповые испытания по грунту как испытания на надежность, сам процесс можно трактовать как вероятность нахождения показателей системы «фундамент + тело опоры» в некоторой допустимой области, определяющей показатели несущей способности и деформативности. Выход одного или нескольких показателей за пределы допустимой величины или области приведет к отказу опоры или моста в целом, что связано с определенным экономическим ущербом в зависимости от тяжести вызываемых последствий [7, 8].

В общем виде отказ характеризуется условием

$$\Pi_I(t) = \varnothing_i(t) - R_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где $\varnothing_i(t)$ – i -й расчетный показатель несущей способности буронабивной сваи; $R_i(t)$ – предельное значение несущей способности грунта под острием сваи; n – число показателей прочности, деформативности и нагружения.

Известно, что геометрические и физические характеристики свайного фундамента, грунтов и нагрузки, воспринимаемые в процессе эксплуатации, носят изменчивый, даже случайный характер. Тогда $\varnothing_i(t)$ и $R_i(t)$ и их расчетные предельные значения являются также случайными функциями време-

ни. С большей долей вероятности безотказную работу опоры моста, как и наступление отказа за расчетный период, можно прогнозировать только с вероятностью $P_i(t_0)$, используя выражение [9]:

$$P_i(t) = P(\Pi_i(t)) = \varnothing_i(t) - R_i(t) > 0. \quad (10)$$

Рассматривая несущую способность сваи и грунтового массива под острием сваи и нагрузки, действующие как на одну сваю, так и на весь фундамент в целом как случайные величины, вероятность отказа и среднеожидаемое число отказов по сравнению с проектным решением будем определять неравенством [10, 11]:

$$P_i(t_0) \leq P_i(t_0) / [1 - P_i(t_0)]. \quad (11)$$

Для количества m штамповых испытаний среднеожидаемое число значений, необходимых для обсуждения и сопоставления, равно:

$$H = \sum_{i=1}^m P_i. \quad (12)$$

Тогда значения одинаковой или близких к одинаковой вероятности надежности определяются из

$$H_i = P_i m. \quad (13)$$

В случае независимых штамповых испытаний при $P_1 = 0,1$ и $m=10$ вероятность получения достоверной величины параметра несущей способности сваи и деформативности грунта подошвы под острием сваи определяется неравенством

$$P_{10} \langle H_{10} = 1, 0 \rangle P_{10}(t)(1 - P_{10}) = 1,25, \quad (14)$$

где $P_{10} = 1 - (1 - P_1^{10}) = 0,349$, а $P_{10} / (1 - P_{10}) = 0,539$. Таким образом, разница 0,190 указывает на выборочное число испытаний m , которое не является обсуждаемым показателем несущей способности и деформативности независимых испытаний.

Штамповые испытания относятся к характеристикам статистического метода надежности и долговечности. Вероятность безотказной работы свайного поля после проведения штамповых испытаний одной сваи [12, 13] вычисляется из

$$P_s = e^{-t/m}, \quad (15)$$

где P_s – вероятность безотказной работы; t – время испытания; m – среднее время между отказами; e – основание натурального логарифма.

Если штамповые испытания по грунту определяются программой, то время испытания и требуемый уровень доверия λ к результатам, равный 0,95, определяется выражением [14]:

$$\lambda_{95\%} = \frac{f}{N \cdot t} 10^{-5} / 1000 \text{ часов} = 0,0025, \quad (16)$$

где N – число испытываемых свай 1; t – время испытания; f – число отказов за время испытания 4.

Следовательно, вероятность отказа при испытании грунта под острием сваи с уровнем доверия $\lambda_{95\%} = 0,0025$. Оптимальное среднее время t штамповых испытаний, соответствующее обеспечению надежности эксперимента, равной 0,95 для одной сваи в составе куста свайного ростверка, состоящего из 10 штук, определяется целевой функцией T_i , исходя из выражения на основе процедуры пошаговой оценки осадки [15, 16, 17]:

$$T_i = b_n \cdot \sigma_i \sqrt{X_i}, \quad (17)$$

где σ_i – среднее квадратичное отклонение в показателях осадки; X_i – число свай, за вычетом испытываемой; b_n – коэффициент, определяемый из

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{b_n}^{\infty} e^{-\frac{t_i^2}{2}} dt_i = 1 - \sqrt[3]{1/2} \text{ принимается равным } 1,5; n = 10; t_i \text{ – нормативное}$$

время процедуры одного нагружения (табл. 2).

Таблица 2

Пошаговая оценка осадки грунта

Table 2

Step-by-step assessment of soil settlement

Номер сваи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T_i	10	10	10	10	30	30	30	30	30	30
σ_i	1	1	3	3	3	1	3	3	10	10
t_i	1	1	1							

При проведении штамповых испытаний возможны ситуации, когда может оказаться априорной вероятность наличия хотя бы одного отказа из куста свайного ростверка фундамента [18]. В этом случае при проведении значительного количества штамповых испытаний грунта под острием сваи необходимо ориентироваться на среднее время в рамках одного испытания. Если вероятность отказа в процессе одного испытания велика и реальна в процессе обнаружения на каждом этапе нагружения, то используем уровень глобального теста [19, 20] на очередном этапе нагружения. Для подтверждения факта отказа применяется выражение случайного поиска цели:

$$\frac{C_0}{R_j^k \cdot P_c} \leq \frac{C_j}{1 - P_c}, \quad (18)$$

где C_0 – сумма затрат на полный объем испытаний; C_j – затраты на k -й этап;

P_c – вероятность отсутствия отказа в оставшихся элементах.

Таким образом, применение зависимостей Вейбулла и Байеса и других показателей надежности испытаний позволило обосновать по средней вели-

чине времени, затраченного на нагружение, справедливость интерполяционного эксперимента по Кохрену в виде $S_{Q_i} = S_{\max}^2 / \sum_{n=1}^n S_n^2$, адекватного по значениям аппроксимированной параболической зависимости. Рассмотренные примеры плотности вероятностей возможных отказов в функции времени допускают некоторые ограничения в виде этапов и времени нагружения без снижения достоверности результатов испытаний. Представляя штамповые испытания глобальным тестом, количество нагружений при испытании определяется функцией случайного поиска цели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. Москва : Высшая школа, 1988. 238 с.
2. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. Москва, 1969. 329 с.
3. Raizer V. Reliability of Structures Subjected to Corrosive Wear // J. Technical Mechanics. 1990. № 11. P. 73–32.
4. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / под общ. ред. А.А. Свешникова. Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2008. 445 с.
5. Доброхотов И.С., Трухин Б.В. Анализ зависимости диаграммы деформирования от различных параметров путем построения доверительной полосы // Методы решения задач упругости и пластичности : межвузовский сб. Вып. 6. Горький, 1972. С. 200–214.
6. Справочник по надежности. Т. I : пер. с англ. Москва : Мир, 1969. 320 с.
7. Ушаков И.А. Приближенное решение задачи об оптимизации среднего времени безотказной работы системы // Надежность и контроль качества. 1971. № 11. С. 71–75.
8. Raizer V. Theory of Reliability in Structural Design // AMR. 2004. V. 57. № 1. P. 1–21.
9. Судаков Р.С., Тескин О.П., Филиппов В.А. Метод определения требований к надежности элементов системы при заданном нижнем доверительном пределе для вероятности безотказной работы системы // Надежность и контроль качества. 1974. Вып. 3. С. 50–56.
10. Барлоу Р., Хантер Л. Критерии определения оптимальной избыточности // Оптимальные задачи надежности. Москва : Изд-во комитета стандартов, мер и измерений при Совете Министров СССР, 1968. С. 129–156.
11. Rackwitz R., Schrupp K. Quality Control Prof Testing and Structural Reliability // J. Structural Safety. 1985. № 2. P. 239–244.
12. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. England : John Wiley and Sons. Ltd., 1996. 372 p.
13. Тетнер А.И. О надежности конструкций, взаимодействующих с грунтом // Проблемы надежности в строительном проектировании. Свердловск, 1972. С. 220–224.
14. Битайнис А.Г. Исследование эффективности современных конструкций свай с учетом фактора времени // Методы оценки эффективности фундаментов с учетом фактора времени. Рига, 1975. С. 93–148.
15. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу совершенствования штамповых испытаний грунта в основании буронабивных свай при строительстве опор мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 2. С. 207–222. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-207-222
16. Takaoka N., Shiraki W. Reliability analysis of Structural members Composed of Several random processes // J Struct. Mech. 1984. 1212. P. 151–180.
17. Мирный А.М., Соловьев А.Д. Оценка надежности системы по результатам испытаний ее компонент // Кибернетику – на службу коммунизма. Т. 2. Москва ; Ленинград : Энергия, 1964. С. 41–52.

18. Тимашев С.А., Штерензон В.А. Практические методы расчета надежности разных систем при действии сочетания случайных нагрузок // Исследования в области надежности инженерных сооружений. Ленинград : Ленинградский Промстройиниипроект, 1979. С. 36–52.
19. Hasofer A.M., Lind N.C. An Exact and Invariant First order reliability Format // J. Eng. Mech. 1974. 100. ASCE. № EM1. P. 111–121.
20. Huber P.J. Robust estimation of location parameter // The Annals of Mathematical Statistics. 1964. V. 35. № 1. P. 73–101. DOI: 10.1214/aoms/1177703732

REFERENCES

1. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeyev V.Z. Machine reliability. Moscow: Vysshaya shkola, 1988. 238 p. (In Russian)
2. Smirnov N.V., Dunin-Barkovskiy I.V. Course on probability theory and mathematical statistics. Moscow, 1969. 329 p. (In Russian)
3. Raizer V. Reliability of structures subjected to corrosive wear. *Technical Mechanics*. 1990; (11): 73–32.
4. Sveshnikov A.A. (Ed.) Collection of problems in probability theory, mathematical statistics and random function theory. Saint-Petersburg; Moscow; Krasnodar: Lan'. 2008. 445 p. (In Russian)
5. Dobrokhotov I.S., Trukhin B.V. Analysis of stress-strain curve dependence on various parameters using confidence interval. *Metody resheniya zadach uprugosti i plastichnosti*. 1972; (6): 200–214. (In Russian)
6. Reliability handbook. Vol. I. Moscow: Mir, 1969. 320 p. (Russian translation)
7. Ushakov I.A. Approximate solution to optimization problem of the mean time to system failure. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva*. 1971; (11): 71–75. (In Russian)
8. Raizer V. Theory of reliability in structural design. *AMR*. 2004; 57(1): 1–21.
9. Sudakov R.S., Teskin O.P., Filippov V.A. Reliability determination requirements of system elements at lower confidence limit for system survival probability. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva*. 1974; (3): 50–56. (In Russian)
10. Barlow R.E., Hunter L.C. Criteria for determining optimum redundancy. In: Optimal problems of reliability. Published by the Committee on Standards, Measures and Measurements of the USSR Council of Ministers, Moscow, 1968. Pp. 129–156. (Russian translation)
11. Rackwitz R., Schrupp K. Quality control prof testing and structural reliability. *Structural Safety*. 1985; (2): 239–244.
12. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. England: John Wiley and Sons, Ltd., 1996. 372 p.
13. Tetner A.I. Reliability of soil-interacting structures. In: Problems of reliability in building design. Sverdlovsk, 1972. Pp. 220–224. (In Russian)
14. Bitaynis A.G. Efficiency of modern pile design with regard to time factor. In: Methods for evaluating the effectiveness of foundations with regard to time factor. Riga, 1975. Pp. 93–148. (In Russian)
15. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Alekseev A.A. Improvement of soil plate-bearing test of drilled pile foot during bridge support construction. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (2): 207–222. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-207-222 (In Russian)
16. Takaoka N., Shiraki W. Reliability analysis of structural members composed of several random processes. *Journal of Structural Mechanics*. 1984; 1212: 151–180.
17. Mirnyy A.M., Solovyev A.D. System reliability assessment based on component testing. In: Cybernetics for Communism. Vol. 2, Moscow; Leningrad: Energia, 1964. Pp. 41–52. (In Russian)
18. Timashev S.A., Shterenzon V.A. Practical methods for calculating reliability of different systems under combined random loads. In: Research into reliability of engineering structures. Leningrad, 1979. Pp. 36–52. (In Russian)
19. Hasofer A.M., Lind N.C. An exact and invariant first order reliability format. *Journal of Engineering Mechanics*. 1974; 100 (EM1):111–121.
20. Huber P.J. Robust estimation of location parameter. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1964. 35 (1): 73–101. DOI: 10.1214/aoms/1177703732

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alekseev10@yandex.ru

Authors Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanaya Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Audrey V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanaya Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@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 15.05.2023
Одобрена после рецензирования 18.05.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 15.05.2023
Approved after review 18.05.2023
Accepted for publication 16.06.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 211–225.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 211–225.

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

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7/8

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225

EDN: FКОННУ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЧАШИ ПРОГИБА НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ УСТАНОВКАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Михаил Юрьевич Горский¹, Евгений Николаевич Симчук¹,
Георгий Фаррухович Кадыров¹, Алексей Евгеньевич Симчук²**

¹Научно-исследовательский институт
транспортно-строительного комплекса, г. Москва, Россия

²Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба дорожной одежды при испытаниях по оценке прочности установками динамического нагружения.

Актуальность работы обусловлена высоким влиянием температуры асфальтобетона на результаты испытаний и необходимостью ее учета путем приведения получаемых при фактической температуре результатов к сопоставимому с проектными данными виду при выполнении диагностики эксплуатируемых автомобильных дорог.

Цель экспериментальных исследований – выявление температурных факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметры чаши прогибов, и получение зависимостей прогибов от температуры на различных конструкциях дорожных одежд. Для проведения исследований использовалась установка динамического нагружения, имитирующая приложение нагрузки от движущегося грузового автомобиля, оборудованная измерителями прогиба, располагающимися в центре приложения нагрузки и на различном расстоянии от него. В рамках исследований совместно с измерениями прогибов определялась температура воздуха, дорожного покрытия и асфальтобетона на различной глубине, строились зависимости указанных параметров.

В результате проведения исследований удалось выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на параметры чаши прогибов. Достигнутые результаты позволяют приводить прогибы в сопоставимый с проектными значениями вид и в дальнейшем использовать их для определения общей несущей способности, а также оценивать состояние отдельных конструктивных слоев, тем самым повышая достоверность назначения ремонтных мероприятий.

Ключевые слова: дорожная одежда, несущая способность, прочность, динамическое нагружение, чаша прогиба, температура, асфальтобетон, модуль упругости

Для цитирования: Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежест-

ких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHHU

ORIGINAL ARTICLE

TEMPERATURE EFFECT ON FLEXURAL BOWL DETERMINED BY FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER TESTING

Mikhail Y. Gorskii¹, Evgenii N. Simchuk¹,
Georgii F. Kadyrov¹, Aleksei E. Simchuk²

¹Research Institute of Transportation and Construction Complex,
Moscow, Russia

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
Moscow, Russia

Abstract. The article presents the research results of the temperature influence on the flexural bowl on the road surface determined by falling weight deflectometer testing. The work relevance is conditioned by the high temperature effect of asphalt concrete on test results and the need to take it into account by bringing the results obtained at the actual temperature to a comparable form with the design data, when performing diagnostics of operating highways.

Experiments identify the temperature factors that have an impact on the flexural bowl parameters. Temperature dependences are suggested for the flexural bowl on different road surfaces. A falling weight deflectometer is used to simulate the load produced by a moving truck, equipped with deflection meters located at the load center and various distances from it. Together with flexure bowl measurements, the temperatures of air, pavement and asphalt concrete at various depth is determined and dependences of these parameters are plotted.

The paper identifies factors that have the greatest influence on the flexural bowl parameters. The results make it possible to bring flexural bowls into a form comparable with design values and subsequently use them to determine the overall bearing capacity of the pavement as well as to assess the condition of individual structural layers, thereby increasing the reliability of repair measures.

Keywords: pavement, bearing capacity, strength, dynamic loading, flexural bowl, temperature, asphalt concrete, elastic modulus

For citation: Gorskii M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E. Temperature effect on flexural bowl determined by falling weight deflectometer testing. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHHU

Введение

Одним из основных показателей состояния дорожной одежды является несущая способность. В связи с этим ее обеспечению и контролю уделяется значительное внимание при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

Оценка прочности, т. е. сопоставление фактической несущей способности с требуемым значением, в РФ ранее регламентировалась различными нормативно-техническими документами, в частности ОДН 218.052, ОДМ 218.4.039-2018

и ОДМ 218.2.024-2012. До недавнего времени данный вид диагностики сводился к двум основным методикам:

- к визуальной оценке состояния дорожного покрытия с расчетом вероятного значения коэффициента прочности в зависимости от средневзвешенного балла, вычисляемого по наиболее часто встречающимся видам дефектов;
- к инструментальной оценке, выполняемой установками статического и динамического нагружения, позволяющими оценить прогиб в центре приложения расчетной нагрузки и вычислить фактический модуль упругости, который впоследствии сопоставляется с требуемым значением.

Визуальная оценка не позволяет в полной мере определить состояние дорожной одежды и выявить причины его ухудшения. При этом мероприятия, связанные с заменой верхнего слоя, как наиболее часто встречающийся вид работ, в значительной мере искажают результаты визуальной оценки прочности и приводят к ошибкам при планировании стратегии ремонтных мероприятий для обеспечения требуемых сроков службы.

Инструментальные методы, применяемые ранее, основывались только на определении общей несущей способности и не позволяли оценить состояние отдельных конструктивных слоев. С введением в действие ГОСТ 32729 и ГОСТ Р 59918 в нашей стране, как и во многих ведущих зарубежных странах, прочность дорожных одежд в целом и отдельных конструктивных слоев стала оцениваться комплексно по результатам испытаний установками динамического нагружения (Falling Weight Deflectometer, далее – FWD), исходя из значений прогибов на различном расстоянии от центра приложения нагрузки.

Исследования в данном направлении в последнее десятилетие велись достаточно активно, что позволило разработать и апробировать программные комплексы [1, 2, 3, 4, 5, 6, 10] и методики [7, 8], посвященные расчету фактических модулей упругости отдельных конструктивных слоев на стадии эксплуатации [1, 9, 11]. Подробные характеристики слоев в большинстве случаев необходимы для назначения оптимальных ремонтных мероприятий.

В зарубежной практике исследованиям вопросов определения модулей упругости отдельных конструктивных слоев и временной и частотной корректировки также уделяется значительное внимание [12, 13, 14, 15].

Исходя из действующей методики проектирования нежестких дорожных одежд [16], расчет по критерию упругого прогиба выполняется при температуре слоев из асфальтобетона, составляющей 10 °С. Следовательно, для сопоставления фактических и проектных параметров несущей способности конструкции результаты испытаний по оценке прочности, полученные при различных температурах, необходимо приводить к указанной расчетной температуре.

Основными исходными данными для расчета модулей упругости материалов слоев являются: параметры чаши прогиба, толщины конструктивных слоев и параметры динамического воздействия (фактическая нагрузка, площадь нагрузочной плиты, время импульса).

В свою очередь, прогибы зависят от целого ряда факторов, к основным из которых относятся:

- температурные факторы;
- конструкция дорожной одежды;

- параметры динамического воздействия;
- состояние грунтов земляного полотна.

Опыт выполнения испытаний показывает, что на результаты оценки прочности также могут влиять дополнительные факторы, общий вклад которых определить достаточно сложно. К таким факторам можно отнести:

- наличие дефектов (прежде всего трещин) в слоях из материалов, содержащих вяжущее;
- фактический срок службы в момент испытаний нагружением (включая количество приложений нормативной осевой нагрузки);
- точность и правильность выполнения методики испытаний;
- техническое состояние измерительных установок;
- функциональные возможности используемого программного обеспечения для выполнения аналитических задач и расчетов.

Как было определено в выполняемых исследованиях, одним из наиболее значимых является температурный фактор. Ранее в нормативно-технических документах и исследованиях данному фактору уделялось незначительное внимание. Измерения температуры слоев асфальтобетона практически не выполнялись ввиду их относительной длительности и сложности по сравнению с фиксацией температуры воздуха или поверхности.

Целями выполненных экспериментальных исследований, которые легли в основу данной статьи, стали:

- выявление наиболее значимых температурных параметров для дальнейшего учета при разработке методики корректировки погибов;
- оценка влияния температурных факторов на чаши прогибов и общий модуль упругости;
- определение зависимостей температуры и прогибов различных дорожных конструкций.

Методы

Исследование влияния температуры на прогибы дорожной конструкции выполнялось с использованием установки динамического нагружения производства Dynatest (Дания), соответствующей требованиям ГОСТ 32729.

Принцип действия установок данного типа заключается в создании кратковременной нагрузки с заданными параметрами на поверхности покрытия путем сброса груза определенной массы с различной высоты на систему демпферов, передающих импульс на нагрузочную плиту, имитирующую колесо грузового автомобиля. По результатам испытания фиксируется прогиб в центре приложения нагрузки и на различном расстоянии от него. В рамках исследований на применяемой установке прогиб фиксировался 9 датчиками: в центре нагружения и на расстоянии 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800 мм.

Установка Dynatest (рис. 1) является одним из наиболее распространенных в мире приборов для оценки прочности динамическим нагружением и имеет следующие основные метрологические характеристики:

- диаметр четырехсегментной нагрузочной плиты – 300 мм;
- диапазон создаваемых нагрузок – от 7 до 120 кН;
- датчик измерения прогиба – геофон в количестве 9 шт.;

- длительность импульса нагружения – от 0,025 до 0,030 с;
- погрешность измерений прогиба – не более 2 %;
- производительность – до 60 измерений в час.



Рис. 1. Установка FWD Dynatest 8000

Fig. 1. Dynatest 8000 FWD

В настоящее время в Российской Федерации также производятся и широко применяются установки динамического нагружения, по своим метрологическим характеристикам не уступающие зарубежным аналогам, например, система измерения прочности дорожных одежд «Дина-4».

Для измерения температуры воздуха и температуры поверхности покрытия применялись термометры, размещенные на установке динамического нагружения. Для измерения температуры слоев асфальтобетона на различной глубине применялся термометр Termex диапазоном измерения температуры от -30 до 150 °C с погрешностью $0,1$ °C. Измерения выполнялись в специально просверленных отверстиях в слое асфальтобетона, заполненных смесью воды и глицерина.

Измерение температуры слоев асфальтобетона на различной глубине представлено на рис. 2.

Объектами исследований являлись автомобильные дороги общего пользования различных технических категорий, подведомственные Федеральному дорожному агентству и Государственной компании «Автодор».

Для выполнения комплекса испытаний были выбраны следующие автомобильные дороги:

- 1) автомобильная дорога М-11 «Нева» (Москва – Санкт-Петербург) на участке км 58 – км 68 в Московской области, категория дороги IА;
- 2) автомобильная дорога А-130 в Калужской области, на км 143+600, категория дороги III;
- 3) автомобильная дорога А-108 на участке км 1+200 – км 9+000.

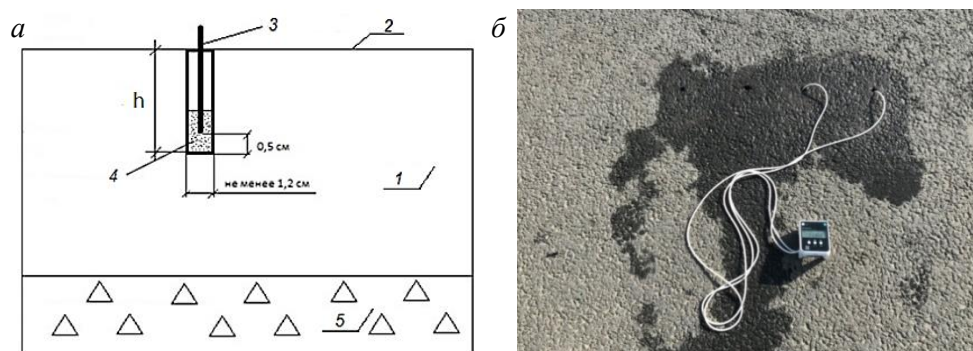


Рис. 2. Схема измерения температуры асфальтобетона (а) и измерения температуры на дороге (б):

1 – слой асфальтобетона; 2 – поверхность покрытия; 3 – термометр; 4 – смесь глицерина и воды; 5 – слой основания под асфальтобетоном

Fig. 2. Schematic of asphalt concrete (a) and road (b) temperature measurements:

1 – asphalt concrete layer; 2 – pavement surface; 3 – thermometer; 4 – glycerin and water mixture; 5 – subgrade

Конструкция дорожной одежды на участке автомобильной дороги М-11:

- щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-20 по ГОСТ 31015 – 6 см;
- горячий плотный крупнозернистый асфальтобетон тип Б по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 8 см;
- горячий пористый крупнозернистый асфальтобетон марки 1 по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 15 см;
- щебеночно-песчаная смесь С-4 по ГОСТ 25607 – 48 см;
- песок мелкий по ГОСТ 8236 – 60 см;
- рабочий слой грунта земляного полотна – песок пылеватый – 30 см.

Конструкция на участке автомобильной дороги А-108:

- щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15 по ГОСТ 31015 на полимерно-битумном вяжущем ПБВ 60 по ГОСТ Р 52056 – 5 см;
- горячий плотный мелкозернистый асфальтобетон тип А марки 1 по ГОСТ 9128 на битуме БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 7 см;
- горячий пористый крупнозернистый асфальтобетон марки 2 по ГОСТ 9128 на битуме БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 8 см;
- оптимальная шлаковая смесь СШ-4-0-А по СТО «Автодор» 2.2 – 13 см;
- неоптимальная шлаковая смесь СШ-6-0-А по СТО «Автодор» 2.2 – 18 см;
- разделяющая прослойка из синтетического нетканого материала с прочностью на разрыв не менее 12 кН/м – без толщины;
- песок по ГОСТ 25100 – 40 см.

Конструкция на участке автомобильной дороги А-130:

- щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-15 на ПБВ 60 по ГОСТ Р 52056 – 5 см;
- горячий плотный асфальтобетон тип Б марки 1 по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 7 см;
- горячий пористый крупнозернистый асфальтобетон марки 1 по ГОСТ 9128 на БНД 60/90 по ГОСТ 22245 – 7 см;

- ЩПС С-5 по ГОСТ 25607 – 33 см;
- песок средней крупности по ГОСТ 8236 – 50 см;
- рабочий слой грунта земляного полотна – суглинок тяжелый пылеватый.

Конструкции исследуемых дорог имеют различную капитальность, представлены разными материалами конструктивных слоев и грунтами рабочего слоя. Толщины асфальтобетона варьируются от 19 до 29 см, несущих слоев основания – от 31 до 48 см.

Для оценки влияния температуры выполнялись испытания на одних и тех же участках автомобильных дорог в одних и тех же точках при различном сочетании температурных факторов. На каждой дороге выполнено от 19 до 21 серии испытаний при различных температурных условиях. Фиксировались следующие температуры:

- воздуха;
- покрытия;
- слоя асфальтобетона на глубине 2,5 см;
- слоя асфальтобетона 5 см;
- слоя асфальтобетона 15 см;
- слоя асфальтобетона на глубине 20 см (при наличии слоев такой толщины).

Испытания выполнялись в диапазоне температуры воздуха от 7,8 до 31,0 °С, температуры поверхности от 4,8 до 47,6 °С, температуры асфальтобетона на различной глубине 2,5 см от 6,0 до 49,0 °С.

При каждом измерении рассчитывался общий модуль упругости по значениям прогибов в центре приложения нагрузки по формуле

$$E = \frac{p \cdot D(1 - \mu^2)}{l}, \quad (1)$$

где p – удельная нагрузка на подошве штампа, МПа; D – диаметр штампа, мм; μ – коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,3; l – прогиб в центре приложения нагрузки, мм.

Результаты

По полученным экспериментальным данным были построены следующие зависимости для каждой автомобильной дороги:

- зависимость прогибов на всех датчиках и общего модуля упругости от температуры поверхности;
- зависимость прогибов на всех датчиках и общего модуля упругости от температуры воздуха;
- зависимость прогибов на всех датчиках и общего модуля упругости от температуры асфальтобетона на различной глубине.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости общего модуля упругости на поверхности дороги от температуры на поверхности покрытия и температуры на глубине 5 см в слое асфальтобетона на исследуемых участках дорог.

По результатам анализа полученных зависимостей была составлена сводная таблица значений достоверности аппроксимации и тем самым выявлены температурные параметры, оказывающие наибольшее влияние на общий модуль упругости и чашу прогибов (табл. 1).

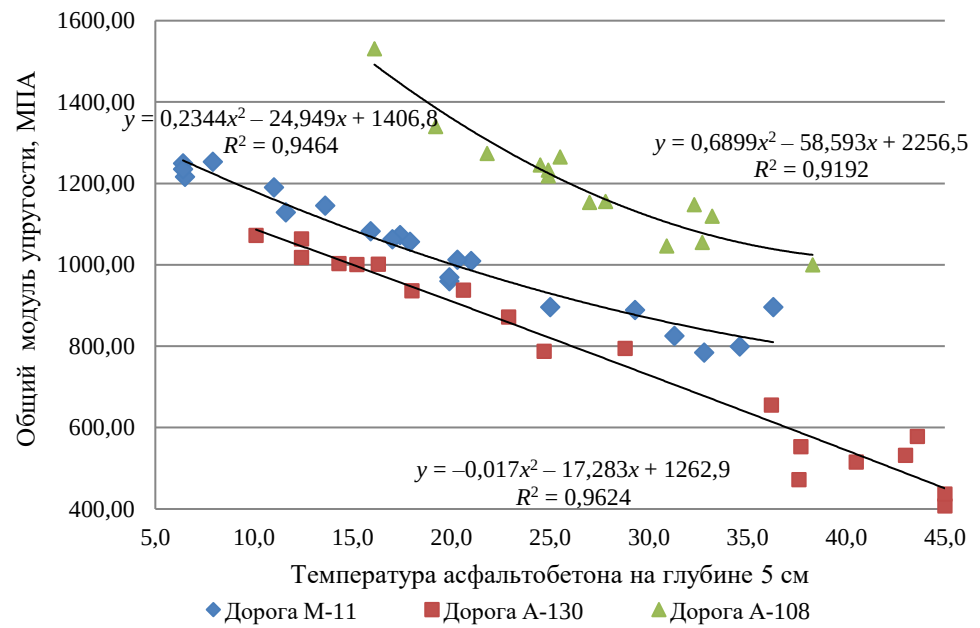


Рис. 3. Зависимость общего модуля упругости от температуры асфальтобетона на глубине 5 см
 Fig. 3. Elastic modulus vs. asphalt concrete temperature at 5 cm depth

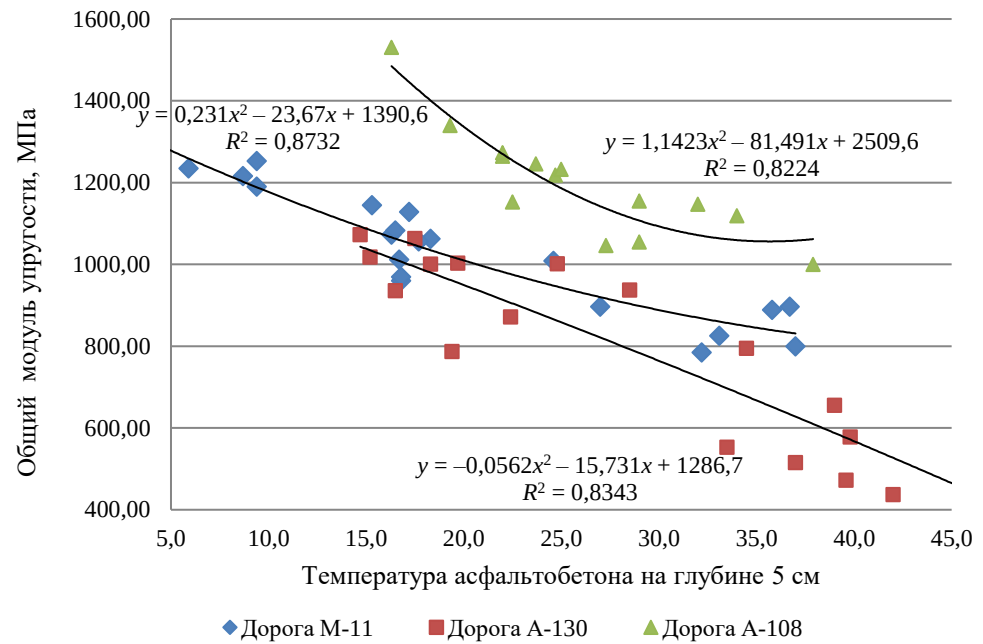


Рис. 4. Зависимость общего модуля упругости от температуры на поверхности покрытия
 Fig. 4. Elastic modulus vs. pavement temperature

Таблица 1

**Зависимость общего модуля упругости дорожной одежды,
определяемого по датчику перемещения
в центре приложения нагрузки, от температурных факторов**

Table 1

**Elastic modulus of pavement determined by displacement sensor
at the load center**

Дорога	Диапазон общего модуля упругости, МПа		Значение достоверности аппроксимации R^2					
	мин	макс	Воздух	Поверхность покрытия	2,5 см	5 см	10 см	15 см
М-11	785	1253	0,92	0,87	0,93	0,95	0,90	0,94
А-130	408	1018	0,69	0,83	0,94	0,96	0,96	0,92
А-108	1000	1530	0,53	0,82	0,83	0,92	0,97	0,95
Среднее значение	—	—	0,71	0,84	0,90	0,94	0,94	0,94

В рамках исследований были также определены зависимости прогибов на различном расстоянии от центра приложения нагрузки и температурных факторов. На примере автомобильной дороги М-11 на рис. 5 и 6 представлены зависимости прогибов в центре приложения нагрузки и прогибов на расстоянии 1200 мм от центра приложения нагрузки и температуры асфальтобетона на глубине 5 см.

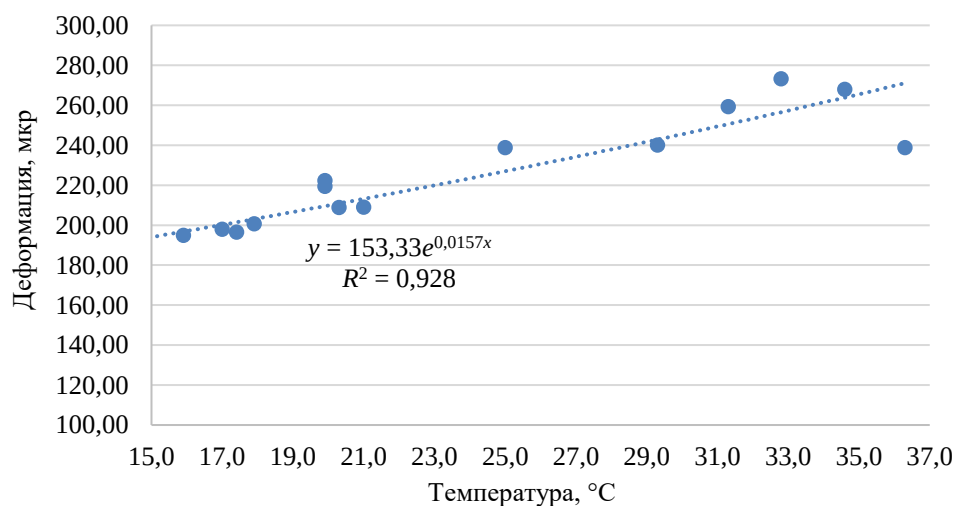


Рис. 5. Зависимость прогиба в центре приложения нагрузки и температуры асфальтобетона на глубине 5 см на автомобильной дороге М-11

Fig. 5. Temperature dependence of flexure at the load center at 5 cm depth on M-11 highway

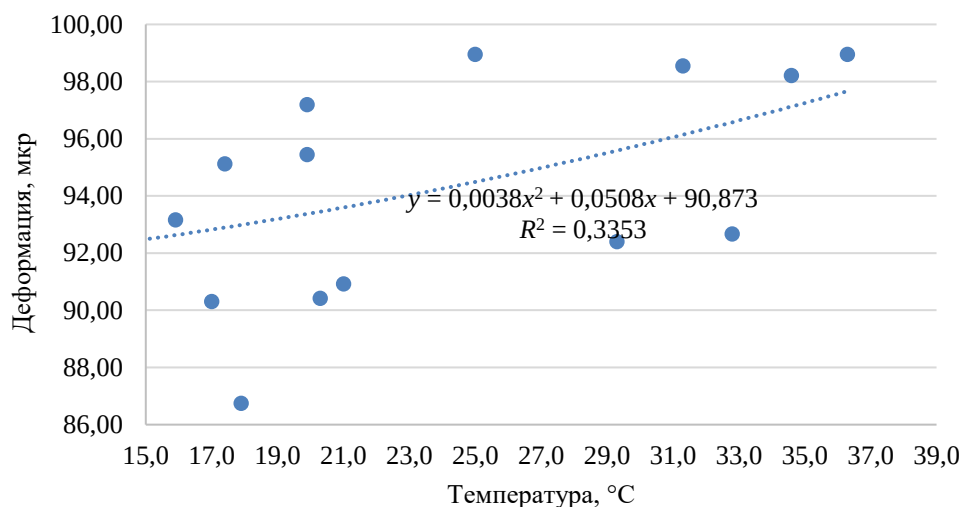


Рис. 6. Зависимость прогиба на расстоянии 1200 мм от центра приложения нагрузки и температуры асфальтобетона на глубине 5 см на автомобильной дороге М-11

Fig. 6. Temperature dependence of flexure at 1200 mm distance to load center at 5 cm depth on M-11 highway

По результатам анализа полученных зависимостей сделаны следующие выводы:

- значения общего модуля упругости, определяемого по датчику перемещения в центре приложения нагрузки, имеют достаточно высокую зависимость от измеренных температур, значение достоверности аппроксимации R^2 составляет от 0,69 до 0,96 (см. табл. 1);

- полученные высокие достоверности аппроксимации между прогибами и температурой слоев асфальтобетона позволяют сделать вывод, что температура асфальтобетона является основным влияющим фактором. Наиболее значимы температуры, измеренные на глубине асфальтобетона от 5 до 15 см. Было выявлено, что влияние температуры на значения прогибов по мере удаления от центра приложения нагрузки значительно снижается. Это подтверждает тот факт, что при выполнении «обратного расчета» [1, 2, 3, 4, 5] прогибы на расстоянии 0,45 м и более характеризуют состояние слоев основания, модули упругости которых не зависят от температуры. Осредненные значения достоверности аппроксимации R^2 составляют от 0,94 для датчиков прогиба в центре приложения нагрузки, до 0,02 для датчиков, расположенных на расстоянии более 1,5 м от точки приложения нагрузки;

- с учетом обеспечения минимальных временных затрат на выполнение замеров, а также единства подхода к исследованиям и сопоставимости получаемых результатов замеры температуры в дальнейших исследованиях и при разработке нормативно-технических документов целесообразно выполнять на глубине 5 см от поверхности покрытия.

С целью приведения экспериментальных чаш прогибов, замеренных при фактической температуре, к расчетной температуре 10 °C были использо-

ваны регрессионные зависимости, полученные в рамках выполненных исследований для различных автомобильных дорог. За основу были взяты регрессионные зависимости изменения прогибов от температуры, замеренной на глубине 5 см для каждого датчика измерения прогиба. Для определения коэффициентов зависимости изменения прогибов от температуры для трех участков автомобильных дорог была принята градация температур от 0 до 50 °С. Коэффициент пересчета для 10 °С равен 1, т. к. данная температура является расчетной.

Анализируя полученные зависимости, можно предположить, что эмпирические коэффициенты в регрессионных уравнениях определяются в том числе толщиной пакета асфальтобетонных слоев, имеющих наибольший модуль упругости среди материалов конструкции. Соответственно на следующем этапе исследований были построены регрессионные зависимости изменения данных эмпирических коэффициентов от фактических толщин пакета асфальтобетонных слоев (табл. 2).

Таблица 2

Эмпирические зависимости для приведения упругих прогибов, замеренных при фактических температурах, к расчетным при температуре 10 °С

Table 2

Empirical dependencies for reducing elastic flexure measured at actual temperatures to reference flexure at 10 °С

№ датчика	Расстояние от центра приложения нагрузки	Формула приведения прогибов к расчетной температуре 10 °С
1	0	$l_{T=10}^0 = l_{T_\Phi}^0 (-0,055 \ln(h) + 1,3563)2,72^{((0,004 \ln(h) - 0,0293)T_\Phi)}$
2	200	$l_{T=10}^{200} = l_{T_\Phi}^{200} (-0,043 \ln(h) + 1,2607)2,72^{((0,0045 \ln(h) - 0,0258)T_\Phi)}$
3	300	$l_{T=10}^{300} = l_{T_\Phi}^{300} (-0,031 \ln(h) + 1,2107)2,72^{((0,004 \ln(h) - 0,0233)T_\Phi)}$
4	450	$l_{T=10}^{450} = l_{T_\Phi}^{450} (-0,03 \ln(h) + 1,1856)2,72^{((0,0035 \ln(h) - 0,0198)T_\Phi)}$
5	600	$l_{T=10}^{600} = l_{T_\Phi}^{600} (-0,044 \ln(h) + 1,2111)2,72^{((0,004 \ln(h) - 0,0198)T_\Phi)}$
6	900	$l_{T=10}^{900} = l_{T_\Phi}^{900} (-0,07 \ln(h) + 1,2625)2,72^{((0,007 \ln(h) - 0,0261)T_\Phi)}$
7	1200	$l_{T=10}^{1200} = l_{T_\Phi}^{1200} (-0,083 \ln(h) + 1,2922)2,72^{((0,0076 \ln(h) - 0,0266)T_\Phi)}$
8	1500	$l_{T=10}^{1500} = l_{T_\Phi}^{1500} (-0,032 \ln(h) + 1,135)2,72^{((0,0031 \ln(h) - 0,013)T_\Phi)}$
9	1800	$l_{T=10}^{1800} = l_{T_\Phi}^{1800} (-0,009 \ln(h) + 1,0659)2,72^{((0,0009 \ln(h) - 0,0064)T_\Phi)}$

Примечание. Здесь $l_{T=10}$ – значение прогиба при расчетной температуре; h – толщина асфальтобетонных слоев, см; T_Φ – фактическая температура асфальтобетона, °С.

Анализ результатов, полученных с использованием представленных зависимостей, показал, что разница между значениями приведенных прогибов к расчетной температуре и фактических прогибов, замеренных при 10 °С, не превышает 5 %.

Предложенный алгоритм лег в основу ГОСТ Р 59918 с учетом ограничения максимальной температуры слоев асфальтобетона 30 °С. Это обусловлено возрастанием отклонений фактических результатов от полученных зависимостей по мере увеличения температуры асфальтобетона, что, в свою очередь, может быть связано с вязко-упругопластичными свойствами асфальтобетона и возможным возникновением остаточных деформаций при высоких температурах.

Заключение

Результаты исследований позволяют корректировать чаши прогибов, полученные в ходе экспериментальных испытаний при выполнении оценки прочности эксплуатируемых автомобильных дорог в рамках диагностики с учетом фактической температуры асфальтобетона. Приведение прогибов в сопоставимый с расчетными параметрами вид позволяет получать объективные данные о состоянии конструктивных слоев эксплуатируемых дорог и увеличить точность назначения ремонтных мероприятий. Вместе с тем данные исследования целесообразно продолжать с учетом разнообразия конструкций и материалов дорожных одежд в нашей стране. Методика может быть доработана по мере накопления данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Углова Е.В. Оценка модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2 (23). С. 170–178.
2. Тиратурян А.Н. Анализ программ для «обратного» расчета модулей упругости конструктивных элементов нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации // Строительство и реконструкция. 2012. № 4 (42). С. 72–78.
3. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Мизонов В.В. Разработка теоретических основ «обратного» расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции на стадии эксплуатации // Известия Ростовского государственного строительного университета. 2011. № 15. С. 84–89.
4. Мизонов В.В., Ляпин А.А., Илиополов С.К. и др. Обратная задача об определении значений модулей упругости слоев эксплуатируемых дорожных конструкций // Строительство и реконструкция. 2011. № 2 (34). С. 89–96.
5. Бочкарев А.В. Анализ надежности обратного расчета упругих параметров дорожных одежд // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 3 (33). С. 5–18.
6. Тиратурян А.Н., Углова Е.В. Программный комплекс для «обратного» расчета динамических модулей упругости эксплуатируемых дорожных конструкций с учетом параметров воздействия установок нагружения дорожных одежд // Наукоедение : интернет-журнал. 2012. № 3 (12). URL: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (дата обращения: 11.05.2023).
7. Тиратурян А.Н., Ляпин А.А., Углова Е.В. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 1. С. 56–65.
8. Углова Е.В., Тиратурян А.Н. Неразрушающие методы оценки состояния нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации. Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2018. 116 с.

9. Мизонов В.В., Тиратурян А.Н. Определение эксплуатационных значений модулей упругости элементов дорожной конструкции // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 18–20 мая 2011 г. Книга 1. Омск, 2011. С. 40–43.
10. Мизонов В.В., Тиратурян А.Н. Использование метода «обратного» расчёта при эксплуатации автомобильных дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 1 (56). С. 25–27.
11. Тиратурян А.Н., Углова Е.В. Расчетно-экспериментальный метод оценки модулей упругости элементов нежестких дорожных конструкций на стадии эксплуатации // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений : Международная научно-практическая конференция, Белгород, 08–10 октября 2013 г. Том 1. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2013. С. 376–382. EDN: ORHUPB
12. Baltzer S., Jansen J.M. Temperature correction of asphalt-moduli for FWD-measurements // Bearing Capacity of Roads and Airfields FHWA : 4th International Conference, U of Minnesota, Army Corps of Engineers, NRC Canada, FAA. 1994. P. 1.
13. Fakhri M., Dezfoulan R.S. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model // Construction and Building Materials. 2019. T. 204. V. 768–780.
14. Le V.P. et al. Development and validation of a temperature correction model for FWD back-calculated moduli // Australian Journal of Civil Engineering. 2022. P. 1–9.
15. Březina I., Machel O., Zavřel T. Temperature correction of deflections and backcalculated elasticity moduli determined from falling weight deflectometer measurements on asphalt pavements // Communications-Scientific letters of the University of Zilina. 2022. V. 24. № 1. P. D1–D8.
16. Горский М.Ю., Кадыров Г.Ф., Стрельцов А.В., Симчук Е.Н. Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства // Дороги и мосты. 2021. № 2(46). С. 53–74. EDN: TPWVZF

REFERENCES

1. Uglova E.V. Elastic moduli of road pavement layers during highway operation. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; 2 (23):170–178. (In Russian)
2. Tiraturyan A.N. Analysis of programs for backward calculation of elastic moduli of structural elements of non-rigid pavements at the operation stage. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2012; 4 (42): 72–78. (In Russian)
3. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Mizonov V.V. Development of theoretical foundations of backward calculation of elastic moduli of road layers during operation. *Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2011; (15): 84–89. (In Russian)
4. Mizonov V.V., Lyapin A.A., Iliopolov S.K., et al. Backward calculation of elastic moduli of road layers. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2011; 2 (34): 89–96. (In Russian)
5. Bochkarev A.V. Backward calculation of elastic parameters of pavements. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2022; 3 (33): 5–18. (In Russian)
6. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Software package for backward calculation of elastic moduli of operated road structures with respect to pavement loading. *Naukovedenie*. 2012; 3 (12). Available: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (accessed May 11, 2023). (In Russian)
7. Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova E.V. Improvement of non-destructive method for determining mechanical characteristics of elements of multilayer road structures. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2023; (1): 56–65. (In Russian)
8. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. Non-destructive methods for assessing non-rigid pavements during operation. Rostov-on-Don, 2018. 116 p. (In Russian)
9. Mizonov V.V., Tiraturyan A.N. Elastic moduli of road structure elements. In: *Proc. 6th All-Russ. Sci. Conf. 'Development of Road Transportation Complex and Construction Infrastructure on the Basis of Rational Environmental Management'*, Omsk, 2011. Pp. 40–43. (In Russian)

10. Mizonov V.V., Tiraturyan A.N. Backward calculation of road operation. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2011; 1(56): 25–27. (In Russian)
11. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Theoretical and experimental evaluation of elastic moduli of non-rigid road structures during operation. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Innovative Materials, Technologies and Equipment for Construction of Modern Transport Facilities'*. Belgorod, 2013. Pp. 376–382. EDN: ORHUPB (In Russian)
12. Baltzer S., Jansen J.M. Temperature correction of asphalt-moduli for FWD-measurements. In: *Proc. 4th Int. Conf. 'Bearing Capacity of Roads and Airfields'*, Minneapolis, MN, USA, 1994. Pp. 17–21.
13. Fakhri M., Dezfoulan R.S. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model. *Construction and Building Materials*. 2019; 204: 768–780.
14. Le V. P., et al. Development and validation of a temperature correction model for FWD back-calculated moduli. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2022. Pp. 1–9.
15. Březina I., Machel O., Zavřel T. Temperature correction of deflections and backcalculated elasticity moduli determined from falling weight deflectometer measurements on asphalt pavements. *Communications-Scientific Letters of the University of Zilina*. 2022; 24 (1): D1–D8.
16. Gorskii M.Y., Kadyrov G.F., Streltsov A.V., Simchuk E.N. Improvement of calculation method of non-rigid pavements taking into account the problem solution of elasticity theory for multi-layer half-space. *Dorogi i mosty*. 2021; 2 (46): 53–74. EDN: TPWVZF (In Russian)

Сведения об авторах

Михаил Юрьевич Горский, инженер, руководитель лаборатории оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог, АНО «НИИ ТСК», 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, gorskiy@niitsk.ru

Евгений Николаевич Симчук, канд. экон. наук, генеральный директор, АНО «НИИ ТСК», 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, simchuk@niitsk.ru

Георгий Фаррухович Кадыров, инженер, руководитель асфальтобетонной лаборатории, АНО «НИИ ТСК», 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, kadyrovgf@niitsk.ru

Алексей Евгеньевич Симчук, магистрант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64, alexsimchuk@bk.ru

Authors Details

Mikhail Y. Gorskii, Engineer, Head of the Laboratory, Research Institute of Transportation and Construction Complex, 111024, 73A, Aviamotornaya Str., Moscow, Russia, gorskiy@niitsk.ru

Evgenii N. Simchuk, PhD, Director General, Research Institute of Transportation and Construction Complex, 111024, 73A, Aviamotornaya Str., Moscow, Russia, simchuk@niitsk.ru

Georgii F. Kadyrov, Engineer, Head of the Laboratory, Research Institute of Transportation and Construction Complex, 111024, 73A, Aviamotornaya Str., Moscow, Russia, kadyrovgf@niitsk.ru

Aleksei E. Simchuk, Graduate Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 64, Leningradskii Ave., 125319, Moscow, Russia, alexsimchuk@bk.ru

Вклад авторов

Горский М.Ю. – концепция исследования; сбор материала; обработка материала; написание исходного текста; итоговые выводы.

Симчук Е.Н. – идея; научное руководство; концепция исследования; научное редактирование текста; итоговые выводы.

Кадыров Г.Ф. – сбор материала; обработка материала; доработка текста.

Симчук А.Е. – сбор материала; обработка материала, редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Gorskii M.Y. wrote the manuscript, provided material collection and processing and drew conclusions.

Simchuk E.N. edited the manuscript and drew conclusions.

Kadyrov G.F. provided material collection and processing and revised the manuscript.

Simchuk A.E. provided material collection and processing and edited the manuscript.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.06.2023

Одобрена после рецензирования 05.07.2023

Принята к публикации 06.07.2023

Submitted for publication 28.06.2023

Approved after review 05.07.2023

Accepted for publication 06.07.2023