

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; nitag@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
Галютдинов 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
Деттярев 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
Каприелов 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
Кумпьяк О.Г., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; kumpyak@yandex.ru
Лотов В.А., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; valotov@ipu.ru
Люсия Тсантисис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; lucia.tsantilis@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; ovsnn@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. Иркутск; 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 № 6 – 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, В.Н. Коршунова, Е.А. Кулешова. Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.

Технический редактор Н.В. Удлер.

Подписано в печать 22.12.2023. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.

Уч.-изд. л. 18,49. Усл. печ. л. 21,96. Тираж 200 экз. Зак. № 97.

Дата выхода: 28.12.2023.

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

№ 6 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@dyfu.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; ygg-tomsk@mail.ru
Volokitin O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Vice-Rector for Academic Affairs, TSUAB, Tomsk, Russia; study@tsuab.ru
Zaichenko N.M., DSc, Professor, Rector, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Russia; mailbox@donnasa.ru

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

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

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

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

Scientific Edition
VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 6 – 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, V.N. Korshunova, E.A. Kuleshova. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 22.12.2023. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 28.12.2023.
Published sheets: 18,49. Conventional printed sheets: 21,96. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 97.

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Поляков Е.Н., Полякова О.П. «Кубическое» направление в творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) (ТГАСУ, г. Томск).....	9
Никишин С.А., Дядченко С.Ф., Сухинина Е.А. Эволюция архитектурных объектов обслуживания автотранспорта в России и СССР (СГТУ, г. Саратов)	29
Березкин С.А. Особенности жилой архитектуры в исторической застройке Астрахани (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург)	44
Пылов П.А., Дягилева А.В., Николаева Е.А., Майтак Р.В., Шалыгина Т.А. Концепт сверточной нейронной сети для классификации экстерьера и интерьера зданий (КузГТУ, г. Кемерово, ТГАСУ, г. Томск)	58
Рыбалкин Е.В. Формирование сельской архитектуры центральной части современного левобережья Саратовского Поволжья (взаимообмен различных культур) (СГТУ, г. Саратов).....	68

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Калдар-оол А.-Х.Б., Донгак О.А. Поверочный расчёт для контроля качества несущих конструкций наземной части (ТувГУ, г. Кызыл).....	78
Хазов П.А., Шкода И.В., Тягунова Л.Ю. Методика определения динамических параметров материала при свободных колебаниях (ННГАСУ, ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).....	89
Максак В.И., Трепутнева Т.А. Расчет двухосного юстировочного зеркала резонатора оптического квантового генератора (ТГАСУ, г. Томск)	102
Мищенко А.В. Напряженно-деформированное состояние пространственного структурно-неоднородного стержня (НГАСУ, НВВКУ, г. Новосибирск)	113

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Крутилин А.А., Крапчатова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Исследование возможности использования алюминатных отходов алюминиевых сплавов для получения глиноземистого цемента (СФ ВолГТУ, АО «Себряковцемент», г. Михайловка).....	125
---	-----

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Бурков П.В., Марина А.А. Разработка системы автоматизированного мониторинга для контроля планово-высотного положения строительных конструкций (ТГАСУ, НИ ТПУ, г. Томск)	139
--	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Бурков П.В., Волков А.Э. Оценка надежности свайного основания в Арктической зоне РФ (ТГАСУ, НИ ТПУ, г. Томск)	152
---	-----

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

Картопольцев А.В. Прогнозирование надежности бистальных балок пролетных строений мостов (ООО «ДИАМОС», г. Томск)	169
Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу надежности несущих балок пролетных строений мостов (ООО «ДИАМОС», ТГАСУ, г. Томск).....	183
Бычков О.А., Пушкарева Г.В. Оценка инженерно-геологических условий проектирования внутрипромысловых автодорог в северных территориях ЯНАО (ТГАСУ, г. Томск)	196
Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Оценка эколого-экономического потенциала концепции устойчивого развития как фактора повышения эффективности дорожно-транспортного сектора (ТГАСУ, г. Томск).....	218
Макая Л.М., Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние битумной эмульсии на свойства асфальтогранулобетонной смеси при устройстве покрытий нежесткого типа автомобильных дорог (ТГТУ, г. Тамбов).....	233

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Polyakov E.N., Polyakova O.P. Cubism in creative activity of Le Corbusier (Tomsk).....	9
Nikishin S.A., Dyadchenko S.F., Sukhinina E.A. Evolution of transport service architecture in Russia and the Soviet Union (Saratov)	29
Berezkin S.A. Residential architecture in historic environment of Astrakhan (Saint-Petersburg).....	44
Pylov P.A., Diagileva A.V., Nikolaeva E.A., Maitak R.V., Shalygina T.A. Convolutional neural network for building exterior and interior classification (Kemerovo, Tomsk).....	58
Rybalkin E.V. Rural architecture of the left bank of Saratov Volga region (interchange of different cultures) (Saratov).....	68

BUILDING AND CONSTRUCTION

Kaldar-ool A.-Kh.B., Dongak O.A. Verification analysis for quality control of load-bearing superstructures (Kyzyl).....	78
Khazov P.A., Shkoda I.V., Tiagunova L.Yu. Determination of dynamic parameters of free vibrating materials (Nizhny Novgorod).....	89
Maksak V.I., Treputneva T.A. Two-axial alignment mirror for optical-quantum generator resonator (Tomsk)	102
Mishchenko A.V. Stress-strain state of rod with heterogeneous structure (Novosibirsk).....	113

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K. Aluminum waste in alumina cement production (Mikhailovka).....	125
--	-----

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Burkov P.V., Marina A.A. Development of automated monitoring for planned-high-altitude position control (Tomsk)	139
---	-----

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Burkov P.V., Volkov A.E. Reliability of pile foundations in the Arctic zone of the Russian Federation (Tomsk)	152
---	-----

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

Kartopoltsev A.V. Reliability prediction of bridge bisteel beams (Tomsk).....	169
Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Alekseev A.A. Towards reliability of load-bearing beams of bridges (Tomsk).....	183
Bychkov O.A., Pushkareva G.V. Geotechnical conditions of in-field road design in northern territories of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (Tomsk).....	196
Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Ecological and economic potential of sustainable development as efficiency increase of road transport service (Tomsk).....	218
Makaya L.M., Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Bitumen emulsion effect on properties of asphalt-concrete mix for non-rigid road pavements (Tambov)	233

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 9–28.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 9–28.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-9-28

EDN: TKNIQM

«КУБИЧЕСКОЕ» НАПРАВЛЕНИЕ В ТВОРЧЕСТВЕ ШАРЛЯ-ЭДУАРДА ЖАННЕРЕ-ГРИ (ЛЕ КОРБЮЗЬЕ)

Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова

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

Аннотация. Статья посвящена начальному этапу парижского периода в проектной и общественной деятельности выдающегося французского зодчего Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье). Его переезд в Париж можно объяснить возросшими профессиональными и творческими амбициями, духовным взрослением молодого мастера. Рассмотрены его первые проектные работы, реализованные во Франции. Это инженерные сооружения, рабочий поселок Оврьер близ Дьеппа и др.

Основное внимание авторов статьи уделено двум жилым особнякам, выполненным в стиле кубизм: дому-студии Амеде Озанфана и вилле американского бизнесмена У. Кука, построенным в середине 1920-х гг. Оценены их генеральные планы, оригинальные решения планов и фасадов, конструктивные решения облегченных каркасов из сборного железобетона. В те годы это был принципиально новый строительный материал, получивший дальнейшее развитие в современной жилой архитектуре.

Отмечено следующее: создатель архитектурного функционализма пришел к логическому заключению, что железобетонные конструкции обладают очень широким композиционным потенциалом, дающим возможность работать не только с плоскими, но и с криволинейными стенами, объемными блоками. Кроме того, именно железобетон позволил Ле Корбюзье успешно апробировать все пять его «основных принципов» современной архитектуры (использование облегченного каркаса, ленточного остекления, плоской кровли и пр.). Именно в этих работах Шарлем-Эдуардом были впервые апробированы технологии изготовления модульных «жилых ячеек». Данные работы стали его первой апробацией концептуальных моделей «современной» архитектуры.

Ключевые слова: Франция, Париж, Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), инженерные сооружения, жилые дома в поселке Оврьер близ Дьеппа, жилые виллы Амеде Озанфана и У.Э. Кука в Париже

Для цитирования: Поляков Е.Н., Полякова О.П. «Кубическое» направление в творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 9–28. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-9-28. EDN: TKNIQM

ORIGINAL ARTICLE

CUBISM IN CREATIVE ACTIVITY OF LE CORBUSIER

Evgenii N. Polyakov, Ol'ga P. Polyakova

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the early creative activity of the outstanding French architect Charles-Édouard Jeanneret known as Le Corbusier. His move to Paris can be explained by the increased professional and creative ambitions, spiritual maturation of the young master. The paper studies his first design works implemented in France include engineering structures, Oviere village near Dieppe, and others.

The main attention is paid to two residential mansions made in the style of Cubism, namely the Ozenfant House and Studio in Paris built in the mid-1920s. Their master plans, original solutions of facades, lightweight frames made of precast concrete are studied herein. For those years, it is a fundamentally new building material, used later in the modern residential architecture. It is noted that the creator of architectural functionalism concludes that reinforced concrete structures have a wide compositional potential that allows working not only with flat, but also with curved-linear walls, volumetric blocks. In addition, reinforced concrete allows him to successfully test his all five principles of modern. In these works, Le Corbusier first tests residential cell technology. These works are his first approbation of conceptual models of modern architecture.

Keywords: France, Paris, Charles-Édouard Jeanneret, engineering structures, residential buildings, Oviere village, Le Corbusier's Ozenfant House and Studio in Paris

For citation: Polyakov E.N., Polyakova O.P. Cubism in creative activity of Le Corbusier. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 9–28. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-9-28. EDN: TKNIQM

Настоящая работа посвящена началу парижского периода в жизни и творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье). В октябре 1916 г. подающий большие надежды швейцарский зодчий переехал в столицу Франции, чтобы навсегда обосноваться там. Ему уже довелось побывать здесь десять лет назад: «Тогда он только начинал свой путь в искусстве, – неофитом, полным романтических надежд, готовый все впитывать, познавать. У себя на родине, в Ла Шо-де-Фоне Жаннере ясно почувствовал свою силу, осознал меру своих возможностей. В Париже для него наступило время творческих испытаний...» [1]. Все свои прежние проекты и постройки, возведенные в Швейцарии [2], амбициозный мастер не посчитал достойными и поэтому не включил их в список своих лучших работ. Судя по всему, «настоящее творчество» для него началось именно с первых парижских проектов.

Переезд Ле Корбюзье в Париж можно объяснить его духовным и физическим взрослением, возросшими профессиональными и творческими амбициями. Встретившись еще во время своих «ознакомительных» путешествий со многими выдающимися зодчими Западной Европы, поработав в их мастерских и изучив

наиболее популярные архитектурные стили той поры (минимализм, модерн, конструктивизм и др.), он пришел к логичному заключению, что настоящих профессиональных высот можно достичь, лишь постоянно вращаясь в этой творческой среде. А для этого нужно создать свою собственную проектную мастерскую и выполнять заказы не только во Франции, но и за ее пределами.

Жизненные обстоятельства сложились для него благоприятно. В Париже он встретил многих своих земляков и коллег, с которыми всегда поддерживал дружеские отношения. Среди них издатель Даниэль Эстле, инженер-строитель Макс Дюбуа (его старый приятель по архитектурной школе Ла Шодде-Фона). Из профессиональных коллег – архитекторы Анри Соваж и Франсис Журден (автор универмага «Самаритен»). Именно Журден когда-то встретил приехавшего в Париж юного Жаннере и дал ему первые деловые рекомендации, а также Огюст Перре, его бывший патрон, с которым все эти годы Шарль-Эдуард не прекращал переписываться. Ему довелось когда-то поработать в мастерской братьев Перре в должности «чертежника на полдня». Конечно же, Огюст не отказался бы снова взять Жаннере к себе в мастерскую, однако в рассматриваемый период у него самого не было проектных заказов. Первая мировая война только набирала обороты, поэтому строительство во Франции находилось в глубоком упадке.

Но достаточно ли высокой была квалификация швейцарского гостя, чтобы соперничать с искушенными парижскими зодчими? Шарль все же рискнул открыть собственное проектное бюро. Сначала он арендовал для этой цели небольшое помещение в многоквартирном доме на ул. Бельзюнс, 20. Бывшая комната служанки размещалась на седьмом этаже, а ее окна были обращены во двор. Поначалу даже эти скромные апартаменты вполне устраивали Жаннере. В ожидании заказов он проводил здесь время в разнообразных занятиях для души – рисовал, писал, размышлял. Местом же для его проживания в столице стала съемная квартира на ул. Жакоб, 20 (рис. 1).



Рис. 1. Шарль-Эдуард Жаннере в своей квартире на ул. Жакоб, 20¹
Fig. 1. Charles-Édouard Jeanneret in his flat at 20 Rue Jacob

¹ URL: https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fpbs.twimg.com%2Fmedia%2FFKoO4JuWQAMoRrQ.jpg&lr=67&p=3&pos=46&rpt=simage&source=related-duck&text=Ле%20Корбюзье%20в%20молодости

Сначала Шарль-Эдуард Жаннере поработал штатным архитектором-консультантом, а затем стал управляющим «Общества по применению армированного бетона» (La Société d'Application du béton armé), возглавляемого Максом Дюбуа, с которым они некогда запатентовали систему «Дом-Ино». За время работы в этой организации (апрель 1917 – январь 1919 гг.) Шарлем было реализовано несколько проектов технических сооружений: водонапорная башня в Поденсаке (деп. Жиронда) (рис. 2, 3), скотобойни в Шаллюи и Гаршизи, оружейный арсенал в Тулузе, электростанция на р. Вьен и др.



Рис. 2. Водонапорная башня в Поденсаке (на заднем плане), деп. Жиронда, Франция (арх. Ш.Э. Жаннере, 1918 г.).²

Fig. 2. Water tower in Podensac (in the background), Gironde, France (architect Ch.-E. Jeanneret, 1918)

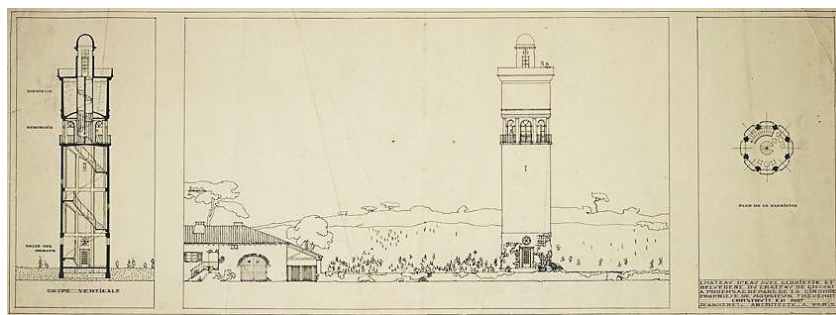


Рис. 3. Проект водонапорной башни в Поденсаке, 1918 г.³

Fig. 3. Project of the water tower in Podensac, 1918

² URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/fr/c/c6/Podensac_Château_d%27eau_Le_Corbusier.jpg

³ URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/fr/c/c6/PodensacChâteaud%27eau_Le

Однако надежда стать «архитектором для толстых» быстро испарилась. Заказов не было, и вряд ли они ожидались в ближайшем будущем, по словам Ле Корбюзье, действительность – вещь неумолимая, поэтому с ней приходится считаться. Поэтому Шарль-Эдуард начал свою проектную деятельность с заказов на сравнительно дешевые индивидуальные жилые дома.

По его проектам тогда строились рабочие поселки с блокированными домами на одну-две семьи. Архитектура этих домов мало отличалась от традиционной. Следует упомянуть один из этих проектов, который демонстрирует эволюцию социальных взглядов будущего мастера. Речь идет о жилых домах в поселке Оврьер близ Дьеппа (рис. 4).



Рис. 4. Жилой дом в поселке Оврьер близ Дьеппа. Архитектор Ш.-Э. Жаннере [1]
Fig. 4. Dwelling house in the village of Ovrerie near Dieppe. Architect Ch.-E. Jeanneret

Это был самый первый проект жилого комплекса, выполненный Ле Корбюзье на территории Франции. Внешний вид зданий довольно заурядный. Похоже, что архитектору пришлось предельно упростить свои амбициозные замыслы, учитывая мнение своих компаньонов и довольно скромные финансовые возможности заказчиков. В этом посёлке было построено двадцать таких зданий. Строились они в основном для заводских рабочих, поэтому не отличались друг от друга. Каждый дом был рассчитан на две семьи. По сути, это была типовая «жилая ячейка (единица)». Подобные посёлки в тот период возводились не только во Франции, но и в Швейцарии, Германии, скандинавских странах.

Вскоре Шарль-Эдуард становится директором дочернего предприятия данной фирмы – завода по производству крупноблочных железобетонных конструкций в Альфортвилле (городке-спутнике Парижа). Изготовление небольших сборных элементов из бетона машинным способом заставило его

задуматься. Ведь на конвейере с помощью механизмов можно быстро монтировать и собирать не только отдельные части и детали зданий (лестничные марши, блоки и панели для стен, несущие стойки, балки перекрытий и пр.), но и целые дома. Поэтому архитектор начал экспериментировать с современными строительными материалами. Эти знания оченьгодились ему позже, когда он стал возводить из железобетона свои первые «белые виллы» и городки из стандартных жилых единиц («типовых домов»). Одно из его изречений, посвященных данной тематике: «Итак, мы подошли к феномену геометрии в архитектуре; я считаю, что в наше время архитектура может начинать оформляться, потому что средства у неё уже есть. Еще 15–20 лет назад архитектура оформиться не могла: в нашем бесспорном распоряжении еще не было такого средства, как железобетон. Конечно, железобетон существует уже последние лет шестьдесят, однако в обиход он вошел и стал применяться в широкой практике только совсем недавно; теперь это расхожее, всем доступное средство. В его основе, как я уже говорил, лежит прямоугольник; с точки зрения логики он – простейшая производная от прямого угла; то есть он для нас изначально привлекателен, поскольку включает главный принцип нашего эстетического удовольствия...» [3, с. 35].

Один из первых его экспериментов в этом направлении – дом-студия французского художника-модерниста Амеде Озанфана (рис. 5).



Рис. 5. Амеде Озанфан, Альбер Жаннере (брат Ле Корбюзье, музыкант), архитектор Ле Корбюзье (слева направо). Reille avenue, 53, Paris, 1922 г.⁴

Fig. 5. Amédée Ozanfan, Albert Jeanneret (Le Corbusier's brother, musician), architect Le Corbusier (from left to right). 53, Reille Avenue, Paris, 1922

⁴ URL: <https://corbusier.totalarch.com/ozenfant>

Дом-студия (ателье) Амеде Озанфана в Париже был запроектирован в 1922 г., а полностью завершён год спустя (рис. 6). Здание расположено на ул. Рейле. Небольшой участок ограничен соседними постройками [4, 5].



Рис. 6. Дом-студия А. Озанфана, 1922–1923 гг. Видовые точки [4]

Fig. 6. Studio house of A. Ozanfan, 1922–1923 [4]

Для Шарля-Эдуарда это был первый проект, выполненный в традициях кубизма (одной из ранних версий авангардизма). Ещё в 1918 г. Амеде Озанфан и Шарль-Эдуард Жаннере выступили с манифестом, в котором говорилось о необходимости создания «абсолютно функционального» искусства» (фр. пуризм). Сферами реализации этого художественного направления стали живопись и архитектура. В данном проекте Жаннере постарался реализовать основные идеи этой новой программы. Кстати, фамилия Ле Корбюзье стала известной именно в связи с этим проектом, что по-своему символично.

Для самого Шарля-Эдуарда проект стал радикальным разрывом с прошлым. При сравнении данного дома с «Турецкой виллой» (Villa Anatole Schwob, «Турку») в Ла Шо де-Фоне, его предшествующим творением в Швейцарии (1916–1917 гг.) [2], возникает ощущение, что эти два жилых здания созданы совершенно разными мастерами. Да и сам Ле Корбюзье считал, что дом Амеде Озанфана открыл принципиально новый этап в его творчестве. Он впервые использовал в архитектуре жилого дома отдельные элементы модерна (выступающие эркеры, винтовые лестницы, металлические ограждения на крыше, почти полностью остеклённый второй этаж и т. д.) (рис. 7).

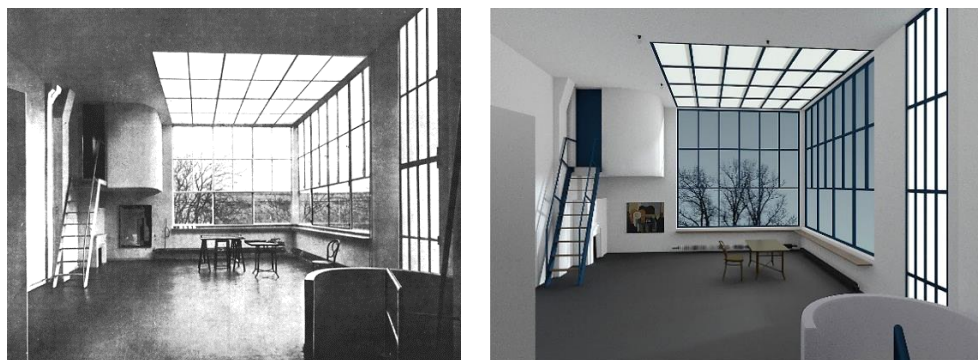


Рис. 7. Дом-студия А. Озанфана, 1922–1923 гг. Видовые точки⁵

Fig. 7. Studio house of A. Ozanfan, 1922–1923

Несущий каркас, все стены и перегородки в этом здании изготовлены из железобетона. С верхнего этажа открываются панорамы окружающей городской застройки, а естественное освещение всех комнат осуществляется с трёх сторон. Вход в дом расположен на боковом фасаде. Его украшают винтовая лестница и навес (рис. 8).

Все помещения этого дома размещены на трех уровнях. Первый уровень включает гараж и подсобные помещения. На втором этаже находятся жилые комнаты и галерея, ведущая на самый верхний (третий) этаж. Там устроен рабочий кабинет художника. Эта комната изначально была задумана как идеальный световой куб с тремя стеклянными гранями (две из них формируют фасады рабочей студии, а третья – потолок) (рис. 9). С помощью этого приема внутреннее пространство кабинета как бы «растворилось», визуально слилось с небом и окружающим ландшафтом.

⁵ URL: <https://i.pinimg.com/originals/65/91/31/659131a92eea9b36878e90c9105f26a7.png>

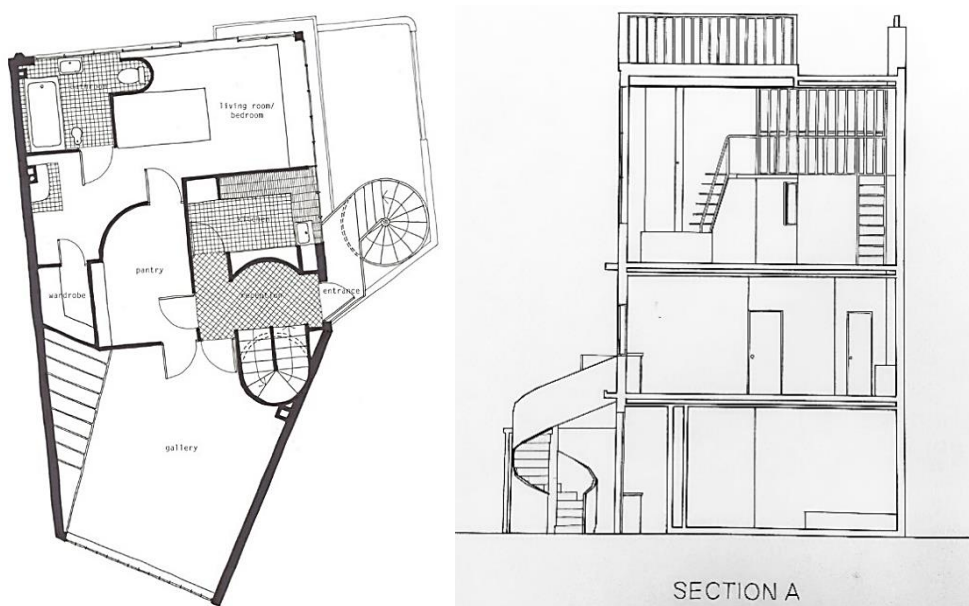


Рис. 8. Дом-студия А. Озанфана, 1922–1923 гг. План, разрез⁶
Fig. 8. Schematic of studio house of A. Ozanfan, 1922–1923



Рис. 9. Макет первоначальной версии дома Амеде Озанфана⁷
Fig. 9. Model of the initial version of Amédée Ozanfan's house

⁶ URL: https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fcorbusier.totalarch.com%2Ffiles%2Fbuild%2F011%2F006.jpg&lr=67&p=1&pos=15&rpt=simage&source=serp&stype=image&text=Дом-студия%20А.%20Озанфана

⁷ URL: <https://corbusier.totalarch.com/ozenfant>

Главный и боковой фасады напоминают картины художников-кубистов того времени. Это регулярные сетки, включающие пропорционально чередующиеся прямоугольные белые стены и более темные оконные рамы. Потолок рабочего кабинета изначально был решен в виде двух «пилообразных» зенитных фонарей, позволявших освещать внутреннее пространство верхних комнат отраженным светом. Впоследствии хозяин заменил эту пространственную конструкцию потолка плоской железобетонной плитой со стеклянной сеткой, т. е. вернулся к изначальной форме куба (античного символа «Трона Зевса») (рис. 10, 11). По мнению Ле Корбюзье, «первое, что делает человек, – выстраивает перед собой прямоугольник, убирает все лишнее, наводит порядок, чтобы вокруг все было ясно видно; человек нашел способ измерять пространство с помощью координат, по трём перпендикулярным осям. Этот феномен порядка у человека всецело врожденный, и удивительно, что вообще приходится о нем говорить...» [3, с. 27].



Рис. 10. Видовая точка рабочего кабинета Амеде Озанфана⁸

Fig. 10. Amédée Ozanfan's workroom

В 1920-х гг. Ле Корбюзье удалось построить еще несколько зданий, которые сделали его одним из лидеров европейского авангарда: «Это исключительно оригинальные, неожиданные для своего времени постройки – с огромными окнами и гладкими белыми стенами – как мы сейчас сказали бы, в духе минимализма. В основном это частные особняки в окрестностях Парижа. Самые известные из них – вилла У.Э. Кука, вилла Ла Роша, вилла Савой в Пуасси, вилла Штейн в Гарш. Эти виллы были настолько своеобразны, что парижане, бывало, собирались перед ними, словно перед каким-то удивительным аттракционом – таких домов они еще не видывали...» [6].

⁸ URL: <https://corbusier.totalarch.com/ozanfant>

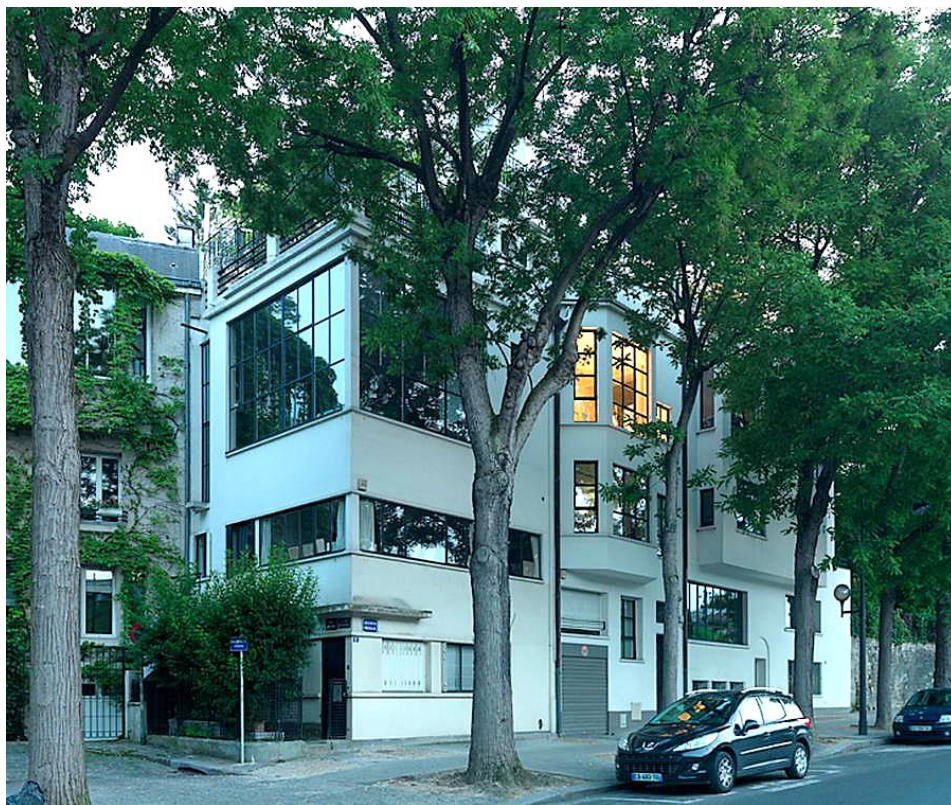


Рис. 11. Дом-студия А. Озанфана, 1922 г. Видовая точка⁹

Fig. 11. Studio house of A. Ozenfant, 1922

Рассмотрим первое из этих жилых зданий, выполненное в традициях кубизма [7, 8].

Вилла У.Э. Кука (*Villa Cook* или *Maison Cook*) – усадебный дом № 6, построенный в 1926–1928 гг. архитектором Ле Корбюзье в Париже на ул. Денфер-Рошро (rue Denfert-Rochereau 92100) (район Булонь-сюр-Сен, Boulogne-sur-Seine, Paris).

Заказчиком проекта стал американский художник-эмигрант Вильям (Уильям) Эдвардс Кук (Cook, 1881–1959). В 1925 г. он вместе со своей женой Жанной Моаллис эмигрировали из штата Айова (США) в Европу. Супруги решили навсегда поселиться в столице Франции. Скульптор Жак Липшиц познакомил их с Ле Корбюзье, который в те годы запроектировал в Париже целую серию вилл, в том числе инновационный дом для самого Липшица. В 1926 г. приезжие американцы поручили архитектору создать то, что позднее Ле Корбюзье назвал «настоящим кубическим домом».

Трёхэтажное здание виллы Кука встроено между двумя жилыми особняками, возведенными по проектам Р. Малле-Стивенса (1926 г.) и Р. Фишера (1927 г.) (рис. 12, 13).

⁹ URL: <https://www.magazindomov.ru/wp-content/uploads/2013/08/Ozenfant-House-and-Studio-2.jpg>



Рис. 12. Вилла Кука (в центре), слева – жилой дом по проекту Роберта Малле-Стивенса (1926 г.), справа – особняк по проекту Раймонда Фишера (Raymond Fisher, 1927 г.)¹⁰

Fig. 12. Cook's Villa (centre), dwelling house designed by Robert Mallet-Stevens (1926) (left), the mansion designed by Raymond Fisher (1927) (right)



Рис. 13. Вилла Кука. Видовая точка со стороны ул. Денфер-Рошро (Париж)¹¹

Fig. 13. Cook's Villa, Rue Denfer-Rochro (Paris)

¹⁰ URL: <https://i.pinimg.com/originals/c9/86/1d/c9861da85ed76dc5b7b8b456a9b d5e78.jpg>

¹¹ URL: https://ic.pics.livejournal.com/george_44/10073425/248781/248781_original.jpg

Вилла Кука – один из первых проектов Ле Корбюзье, в котором были апробированы все пять его архитектурных принципов: круглые опорные столбы-пилоты в основании здания, «свободные» планировки помещений и фасады, ленточные окна и сады на плоской кровле. Рассмотрим их по порядку.

Отличительной особенностью этого здания является его необычное для того времени конструктивное решение. Этот первый принцип «современной архитектуры» подразумевает, что дом будет приподнят над землей на специальных опорах-пилотах, выполненных из железобетона, причем место под самим помещением может быть использовано для автостоянки. Шарль армировал балки каркаса, добиваясь переноса всей нагрузки именно на опору (рис. 14).



Рис. 14. Нижний (наземный) ярус виллы Кука. Видовая точка¹²
Fig. 14. Lower (ground) tier of the Villa of Cook

Применение в проектировании опор и несущих стен стало большим плюсом в выборе форм и размеров окна любой сложности. Оконные проемы можно сделать как лентой, вдоль фасада, так и от угла до угла. Такое новаторское решение значительно изменило облик зданий, построенных по проектам Ле Корбюзье. Как и в доме Амеде Озанфана, главный и задний фасады здесь напоминают регулярные сетки, включающие пропорционально чередующиеся навесные белые стены и более темные прямоугольные оконные проемы. Их геометрический рисунок ни в коей мере не зависит от конструктивного решения несущего каркаса. В этом проявляется второй принцип «современной архитектуры» автора этого уникального здания.

Фасад освобожден от нагромождения опорами – все они находятся внутри дома. Эта особенность дала толчок к творческому подходу в дизайне

¹² URL: <https://corbusier.totalarch.com/files/build/021/007.jpg>

внешнего вида зданий: стены могут быть сделаны не только из легкого или прозрачного материала, но и принимать любые формы. Главный фасад, сочетающий прямоугольники светлых стен и ленточные оконные проемы, подкупает своей «прозрачной невесомостью» и одновременно с этим строгой элегантностью (рис. 14, 15). В этом проявляется третий принцип «современной архитектуры» Ле Корбюзье.



Рис. 15. Фасад виллы Кука со стороны ул. Денфер-Рошро (Париж)¹³
Fig. 15. Cook's Villa facade from Rue Denfer-Rochro (Paris)

¹³ URL: <https://i.pinimg.com/originals/66/26/47/662647bb630ff379473e0e0196146775.jpg>

При этом интерьеры, которые за ними скрываются, по-своему неожиданны и оригинальны. Внутреннее пространство виллы включает несколько функциональных зон. Вход осуществляется через лестничную клетку, расположенную в нижнем («наземном») ярусе здания на его центральной продольной оси («меридиане»). Рядом с ней на этом же уровне устроен «вестибюль без стен», включающий гараж, техническое помещение и открытую площадку. На следующих двух этажах расположены жилые и хозяйственные помещения (гостиная, рабочий кабинет хозяина, спальни, санузлы и пр.) (рис. 16).

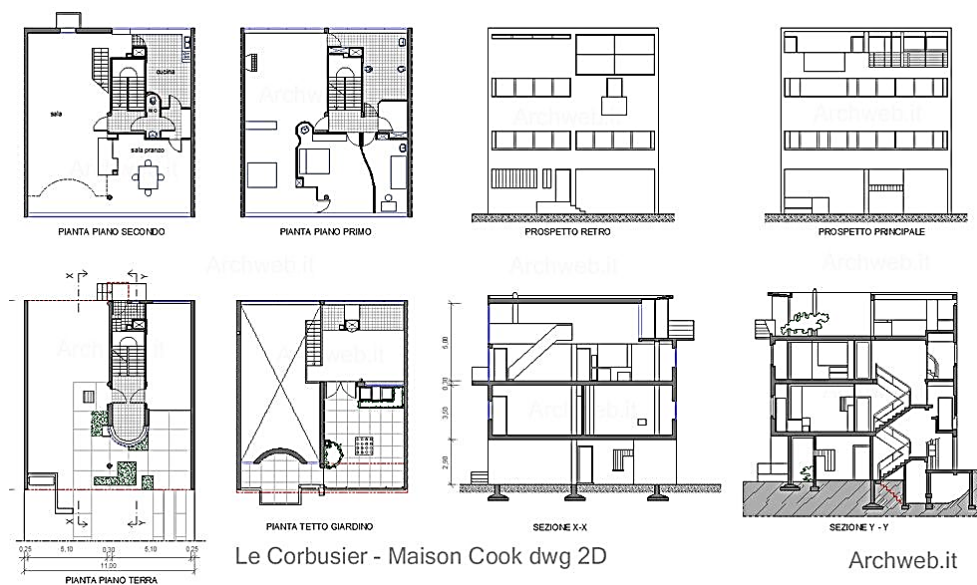


Рис. 16. Вилла У. Кука. Планы этажей, схемы фасадов и разрезы¹⁴
Fig. 16. Schematics of W. Cook's Villa

Все эти комнаты, имеющие «свободную» (не связанную с каркасом) планировку, – четвертый принцип «современной архитектуры» Ле Корбюзье. Они сгруппированы вокруг центральной лестничной клетки, упомянутой выше, и отделены друг от друга плоскими и «округлыми» перегородками.

При использовании столбов-опор из железобетона можно добиться того, что стены больше не будут несущими и внутреннее пространство здания можно смело увеличить. Вместо привычной планировки стало возможным моделировать помещение внутри с помощью перегородок, увеличивая функционал каждого квадратного метра дома. Помимо этого, успешно внедрялись в проектирование криволинейные лестницы, и такой альянс перегородок и лестниц давал эффект взаимопроникновения внутреннего и внешнего пространств (рис. 17).

¹⁴ URL: [https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.archweb.it%2Fdwg%2Farch_arredi_famosi%2FLe_corbusier%2Fmaison_cook%2Faw_maison_cook_dwg.jpg&lr=67&pos=0&rpt=simage&source=serp&style=image&text=Вилла%20Кука%20\(Maison%20Cook\)%2C%20Boulogne-sur-Seine%2C%20Франция.%201926](https://ya.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.archweb.it%2Fdwg%2Farch_arredi_famosi%2FLe_corbusier%2Fmaison_cook%2Faw_maison_cook_dwg.jpg&lr=67&pos=0&rpt=simage&source=serp&style=image&text=Вилла%20Кука%20(Maison%20Cook)%2C%20Boulogne-sur-Seine%2C%20Франция.%201926)



Рис. 17. Интерьеры комнат «Maison Cook». Видовые точки¹⁵

Fig. 17. Maison Cook's room interiors

Криволинейные перегородки, примененные в этом здании, – один из первых примеров возвращения «природных» форм в прямолинейный «конструктивистский» каркас. Внутренний торец лестничной клетки примыкает к поперечной несущей стене, выполняющей роль «внутреннего фасада» этого уникального дома. Вместе с лестничной клеткой эта стена обеспечивает пространственную жесткость несущего каркаса здания. Она украшена с обеих сторон живописными коллажами, обращенными во «внутреннее» (со стороны главного фасада здания) и во «внешнее» (со стороны заднего двора, сада) пространства жилых комнат (рис. 18).



Рис. 18. Цветовое решение интерьера виллы Кука (Буллонь-сюр-Сен, Франция, 1926 г.)¹⁶

Fig. 18. Colouration of the Cook's Villa interior (Boulogne-sur-Seine, France, 1926)

¹⁵ URL: <https://corbusier.totalarch.com/files/build/021/002.jpg>

¹⁶ URL: <https://corbusier.totalarch.com/files/build/021/002.jpg>

Идея визуального расчленения внутреннего пространства представлена «открытой» планировкой двухэтажной гостиной, занимающей часть второго и третьего этажей этого дома (рис. 19).



Рис. 19. Интерьер гостиной виллы Кука. Видовые точки верхнего (слева)¹⁷ и нижнего (справа) ярусов¹⁸

Fig. 19. Interior of the living room of Cook's Villa. Upper (left) and lower (right) tiers

Эта комната выглядит фантастически даже по современным меркам. Она занимает почти половину второго и третьего этажей. Комбинация «узкая дверь + горизонтальное окно над ним», похожая на деформированную букву «Т», позднее была апробирована в холле виллы Ла Роша. В обоих вариантах этот световой проем обращен в сторону домашнего сада (рис. 20).

На плоской кровле дома устроена открытая терраса – пятый принцип «современной архитектуры» Ле Корбюзье (рис. 21).

Подобная вертикальная структура фасада была апробирована во многих городских зданиях того периода. Их первые этажи были избавлены от ограждающих стен. Здесь размещались магазины, кафе или вестибюли гостиниц. Выше надстраивалось несколько стандартных этажей с квартирами или гостиничными номерами. На самом вершине была предусмотрена плоская терраса с садом и квартирой-пентхаузом.

В 1972 г. бывшая вилла Уильяма Эдвардса Кука была объявлена памятником архитектуры и взята государством под охрану [9].

Следующим жилым «кубиком» в списке проектов Шарля-Эдуарда стала вилла Майкла (Михаила) Штейна в Гарше (Воскресене).

Завершая исследование, необходимо уточнить его основные результаты. Нами было отмечено, что переезд Шарля-Эдуарда Жаннере в столицу Франции был вызван его желанием максимально усовершенствовать свой профессиональный потенциал, расширить границы своих познаний в области архи-

¹⁷ URL: <https://corbusier.totalarch.com/files/build/021/014.jpg>

¹⁸ URL: <https://corbusier.totalarch.com/files/build/021/011.jpg>

тектурной стилистики. Именно здесь он получил возможность познакомиться с выдающимися зодчими Западной Европы, основать собственное архитектурное бюро и реализовать свои первые проекты, выполненные в самых различных стилях первой половины XX в.



Рис. 20. Интерьер гостиной Maison Cook. Видовая точка¹⁹

Fig. 20. Living room in Cook's Maison

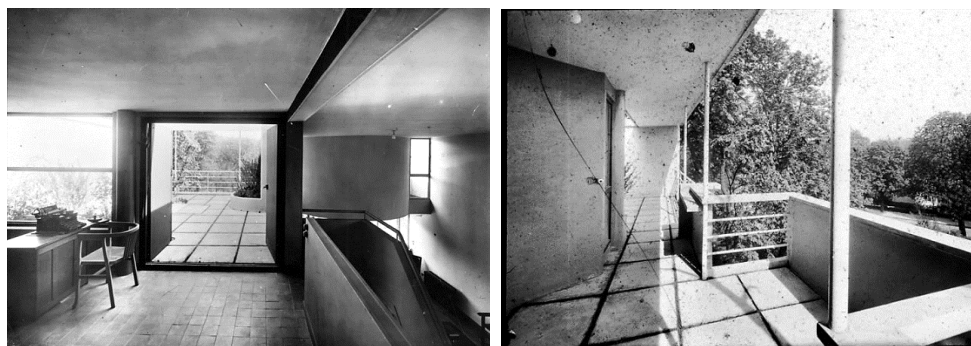


Рис. 21. Видовые точки: слева – выход на террасу, справа – терраса виллы Кука²⁰

Fig. 21. Terrace exit (left) and Cook's Villa terrace (right)

¹⁹ URL: <https://corbusier.totalarch.com/files/build/021/013.jpg>

²⁰ URL: <https://www.researchgate.net/profile/Judith-Bing/publication/317376206/figure/fig5/AS:662157704327182@1534882107606/Le-Corbusier-Maison-Cook-Boulogne-sur-Seine-1926-principal-faade-view-within.png>

В настоящей статье рассмотрено всего два проекта жилых особняков, выполненных в традициях кубизма. Это были первые работы швейцарского мастера, на которых были применены самые различные приёмы формообразования железобетонных конструкций и материалов. И в итоге он пришел к логическому заключению, что данные конструкции обладают очень широким композиционным потенциалом, позволяющим работать не только с плоскими, но и с криволинейными поверхностями. Кроме того, именно железобетон позволил ему успешно апробировать все пять его «основных принципов» современной архитектуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Жаннере снова в Париже*. Теперь навсегда. URL: <https://corbusier.livejournal.com/3785.html>
2. Поляков Е.Н., Полякова О.П. Швейцарский период (1887–1917 гг.) в жизни и творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 9–20.
3. *Ле Корбюзье*. Новый дух в архитектуре. Москва : Strelka Press, 2017. 120 с.
4. *Дом-ателье художника Amédée Ozenfant*, Париж, Франция. 1922 г. URL: <https://corbusier.totalarch.com/ozenfant>
5. *Дом-студия Озанфана*. URL: <https://corbusier.livejournal.com/57442.html>
6. *Ozenfant House*. URL: <https://en.wikiarquitectura.com/building/ozenfant-house/>
7. *Кто такой Ле Корбюзье?* (Who was Le Corbusier?). URL: http://samlib.ru/r/rzhepishewskij_j_n/kto_takoj_le_korbusie.shtml
8. *Уильям Эдвардс Кук*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Edwards_Cook
9. *Вилла Кук* (Maison Cook), Boulogne-sur-Seine, Франция. 1926. URL: <https://corbusier.totalarch.com/cook>
10. *Вилла КУК-2*. URL: <https://corbusier.livejournal.com/44494.html>

REFERENCES

1. Jeanneret is back in Paris. Now forever. Available: <https://corbusier.livejournal.com/3785.html>
2. Polyakov E.N., Polyakova O.P. Life in Switzerland of Charles-Édouard Jeanneret known as Le Corbusier. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (3): 9–20. (in Russian)
3. *Le Corbusier*. The new spirit in architecture. Moscow: Strelka Press, 2017. 120 p.
4. House-studio of the artist Amédée Ozenfant, Paris, France. 1922. Available: <https://corbusier.totalarch.com/ozenfant>
5. Ozenfant's studio house. Available: <https://corbusier.livejournal.com/57442.html>
6. Ozenfant House. Available: <https://en.wikiarquitectura.com/building/ozenfant-house>
7. Who was Le Corbusier? Available: http://samlib.ru/r/rzhepishewskij_j_n/kto_takoj_le_korbusie.shtml (in Russian)
8. William Edwards Cook. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Edwards_Cook
9. Maison Cook, Boulogne-sur-Seine, France. 1926. Available: <https://corbusier.totalarch.com/cook>
10. Maison Cook. Available: <https://corbusier.livejournal.com/44494.html>

Сведения об авторах

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

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

Authors Details

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

Ol'ga P. Polyakova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 24.10.2023
Одобрена после рецензирования 03.11.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 24.10.2023
Approved after review 03.11.2023
Accepted for publication 09.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 29–43.

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 (6): 29–43.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 725.381.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-29-43

EDN: VSSDWR

ЭВОЛЮЦИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТА В РОССИИ И СССР

**Сергей Алексеевич Никишин, Сергей Федорович Дядченко,
Елена Александровна Сухинина**

*Саратовский государственный технический университет
имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия*

Аннотация. Прогресс автомобильного транспорта с конца XIX в. и новизна выдвигаемых этим процессом задач потребовали интенсивного типологического поиска новых и по сути инновационных архитектурных решений. Архитектура объектов обслуживания автомобильного транспорта непосредственно связана с современным ей этапом развития автомобиля как транспортного средства в технологическом и социально-экономическом аспектах. В статье рассматриваются ключевые периоды эволюции архитектурной типологии объектов обслуживания автомобильного транспорта в России и СССР.

Целью исследования стали анализ и обобщение типологических особенностей формирования архитектуры обслуживания автомобильного транспорта в России в зависимости от технологического и социального факторов.

Результаты и выводы. Выявлены этапы формирования типологии объектов обслуживания автомобилей в России и СССР: дореволюционный, советский довоенный, советский послевоенный и постсоветский. Показано, что объекты обслуживания автомобильного транспорта во взаимосвязи с развивающейся автотранспортной сетью с начала XX в. становятся значимыми элементами застройки городов, во многом определяющими их новый облик и образ.

Ключевые слова: архитектурное формирование, инфраструктура обслуживания автомобильного транспорта, эволюция типологических изменений

Для цитирования: Никишин С.А., Дядченко С.Ф., Сухинина Е.А. Эволюция архитектурных объектов обслуживания автотранспорта в России и СССР // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 29–43. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-29-43. EDN: VSSDWR

ORIGINAL ARTICLE

EVOLUTION OF TRANSPORT SERVICE ARCHITECTURE IN RUSSIA AND THE SOVIET UNION

Sergei A. Nikishin, Sergei F. Dyadchenko, Elena A. Sukhinina
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Abstract. The article studies in the national history of the architectural typology evolution of transport services in Russia and the Soviet Union. The progress of motor transport since the

end of the 19th century and new tasks put forward by this process, require an intensive typological search for innovative architectural solutions. Since the beginning of the 20th century, motor transport services together with the developing motor transport network become significant elements of the urban development, largely determining their new image. The architecture of transport service facilities directly relates to the current development of vehicles in technological and socio-economic aspects.

The purpose of the study is to analyze and generalize the architecture typology of the transport service in Russia, depending on technological and social factors.

Keywords: architectural formation, road transport service, typology evolution

For citation: Nikishin S.A., Dyadchenko S.F., Sukhinina E.A. Evolution of transport service architecture in Russia and the Soviet Union. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 29–43. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-29-43. EDN: VSSDWR

Начавшееся в конце XIX в. активное развитие автотранспорта, появление в связи с этим новых задач требуют своевременных архитектурных решений. Объекты обслуживания автотранспорта в совокупности с развивающейся автотранспортной сетью с начала XX в. становятся значимыми элементами застройки городов, формирующими их новый облик и образ. Этапы эволюционного развития автомобиля как транспортного средства определяют типологические особенности архитектуры объектов обслуживания автомобильного транспорта, в том числе в технологическом и социально-экономическом аспектах.

Цель исследования: проанализировать и обобщить типологические особенности формирования архитектуры обслуживания автомобильного транспорта в России в зависимости от технологического и социального факторов.

Технологический фактор отображает как уровень инженерного совершенства конструкции автомобиля, так и его эксплуатационные характеристики, неразрывно связанные с вопросами обслуживания и необходимостью поддержания исправного технического состояния.

Первые автомобили были сложны в эксплуатации, требовали частых текущих и непредвиденных ремонтов, замены технических жидкостей и регулировки, надежность конструкции нуждалась в доработке. Возникла потребность в достаточно большом количестве разнообразных в функциональном отношении помещений для выполнения ремонтных работ. Первые гаражи стали своеобразными многофункциональными комплексами для автомобилистов. Они включали в себя помещения для технического обслуживания, место заправки и хранения топлива, помещения администрации и охраны, зал ожидания для посетителей, магазин продажи запасных частей и инструментов, столовую и даже квартиры или комнаты для водителей-механиков, надстроенные над гаражными боксами. Подобные гаражные комплексы часто располагались в прямой доступности с территории зданий доходных домов, для большего удобства частных владельцев, лично эксплуатирующих автомобиль.

На начальном этапе автомобилизации в конце XIX – начале XX в. происходили существенные изменения в конструкции автомобиля, и соответственно им менялись требования по его обслуживанию и эксплуатации. Можно привести несколько характерных примеров. Так, замена масла в двигателях первых конструкций происходила через каждые 100–500 км. По мере повы-

шения технологичности двигателей и улучшения состава моторных масел этот интервал в 1920–40-х гг. составлял 1000–2000 км, а после 1950-х гг. – более 5000 км и постепенно начал приближаться к современным показателям [1]. В период 1910–30-х гг. происходит повышение надёжности, совершенствование конструкции и технологии производства автомобильной покрышки. Это время изобретения корда, препятствующего «пробитию» колеса, и водоотводящего протектора. Пробег первых покрышек составлял не более нескольких сотен километров и начал достигать показателей в 4500 км только в 1910-х гг., 8000 км – в 1920-х гг., а после 1930-х гг. стал приближаться к современным показателям [2, 3]. Тенденция увеличения ресурса и надёжности применима и ко многим другим элементам и системам автомобиля, например к свечам накаливания, тормозным колодкам и приводным ремням.

Период 1920-х гг. характеризуется ростом мощности двигателей автомобилей. Это позволило применять более тяжёлый закрытый кузов, пришедший на смену открытому 1900–10-х гг. Сами кузова стали цельнометаллическими, без деревянных каркасных элементов и отличались повышенной надёжностью. Это позволяло хранить автомобили на открытых стоянках и снизить потребность в зданиях для хранения автомобилей, неизбежную на первоначальном этапе автомобилизации. Металлический кузов также привел к сокращению площади ремонтных, складских и сушильных помещений, необходимых для кузовных, малярных и обивочных мастерских.

Не менее важно проследить эволюцию социальных аспектов автомобилизации. На начальном этапе автомобиль имел эксклюзивную аудиторию владельцев. В Российской империи – это семья императора и его приближенные, верхняя прослойка дворянства, круг министров, крупных промышленников и общественных деятелей. Первыми автомобилями, появившимися в России, большинство источников отмечают автомобили Собственного Его Императорского Величества, располагавшиеся в гараже в Царском Селе. В послереволюционный период автомобильный транспорт был полностью обобществлен. В СССР в крупнейших городах шло активное развитие общественного автотранспорта. Весь автомобильный транспорт имел государственно-ведомственную принадлежность. Первые автомобили для персонального использования появились в послевоенный период. Со строительством Волжского автозавода стало возможным говорить о массовом персональном автомобиле в СССР. В постсоветский период уровень автомобилизации населения быстро достиг показателей, сопоставимых с европейскими странами. В советский период была создана достаточно развитая инфраструктура обслуживания государственного и муниципального автотранспорта при явной недостаточности объектов обслуживания индивидуального автотранспорта.

Архитектурное формирование и развитие типологии объектов обслуживания автомобильного транспорта в решающей мере определялись уровнями технологического и социально-экономического развития в конкретный временной период. Рассмотрим основные временные этапы эволюции объектов автомобильного транспорта.

Первыми автомобилями, появившимися в России, принято считать автомобили Собственного Его Императорского Величества. Для них в Царском

Селе (Санкт-Петербург) в конце 1905 г. был построен гараж по проекту архитектора дворцового управления С.А. Данини. Гараж представлял собой здание в англосаксонском стиле с элементами фахверка. На первом этаже располагалась стоянка автомобилей, мастерские, складские и подсобные службы гаража, а также каретник для традиционных экипажей, сохранивший свою актуальность ввиду дорожных, климатических и социокультурных факторов.

В 1906 г. начал функционировать первый в России Императорский моторизованный гараж. Второе здание гаража было возведено в 1907–1908 гг. архитектором В.А. Липским и приобрело неофициальное название «дом Кегресса». В нем разместились канцелярия, цейхгауз, кладовые, малярная и столярная мастерские, а также резиденция начальника технической службы и личного шофера императора Николая II Адольфа Кегресса. Особенность здания – скульптурный барельеф, изображающий автомобильные гонки [4].

Третье здание, так называемый Белый гараж, решено в неоклассическом стиле. Гараж был построен в 1913 г., автор проекта – архитектор Петергофского дворцового управления А.К. Миняев. Внутреннее пространство представляет собой единый зал-манеж на 40 автомобилей, перекрытый металлическими фермами с фонарем верхнего света. Гараж был оснащен электромеханическими подъемными воротами, оборудованием для мойки, системой вентиляции и отопления и всевозможными станками, необходимыми для ремонта деталей и механизмов автомобиля¹.

Следует учитывать, что специализированных станций технического обслуживания по ремонту в то время не было. В начале следующего десятилетия автомобиль получает более широкое распространение, что находит отражение в архитектуре гаражей. Так, строения автомобильной фирмы Крюммеля (Санкт-Петербург) в Ковенском переулке (проект архитектора Я.З. Блувштейна) (рис. 1) и на пересечении Дивенской и Малой Монетной улиц (проект архитектора А.В. Болотникова) (рис. 2) – пример многофункционального гаражного комплекса, ключевой особенностью которого стали многоуровневость и устройство лифтов, что особенно важно в условиях плотной застройки города [5, 6]. В гараже на Дивенской улице располагалось 120 автомобильных боксов – по 30 на каждом этаже. Они размещались вокруг центрального лифтового узла с тремя отдельными лифтами для подъема на каждый этаж. В строении важную конструктивную роль играет шахта, являясь монолитным узлом жесткости рамного каркаса. Фасад здания лишен изысканных элементов декорирования – выполнен в стилистике промышленной архитектуры. Благодаря расширившемуся кругу собственников гаражи получили наиболее новаторские на исследуемый момент времени строительные решения, выразившиеся в применении железобетонных конструкций, лифтов, вентиляции, отопления и электричества [7]. Необходимо отметить, что цилиндрическая форма объектов обслуживания автотранспорта в зарубежной практике проектирования данного периода не встречалась, а применение лифтов стало исключительно новаторским для своего времени решением, что позволяет утверждать о передовых

¹ История гаража // ГУП г. Москвы «Дирекция гаражного строительства»: [сайт]. URL: <http://www.mskgarage.ru/ru/stati/istoriya-garazha/> (дата обращения: 07.12.2022).

позициях российских архитекторов в разработке типологии объектов обслуживания автомобилей. Таким образом, к середине 1910-х гг. сформировалась типология гаража, где в одном объеме или едином комплексе зданий располагались все элементы инфраструктуры, необходимые для хранения, заправки и обслуживания автомобиля.

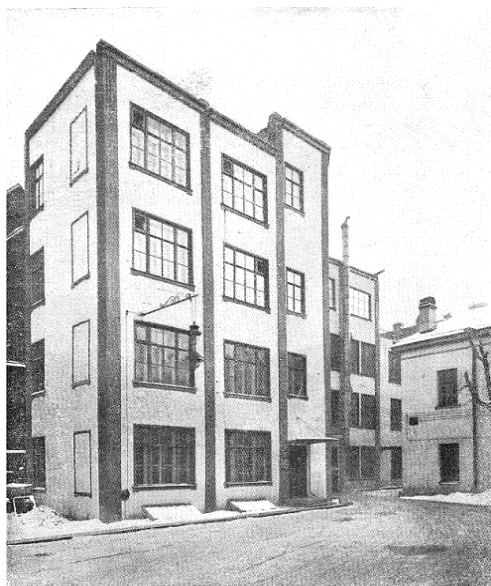


Рис. 1. Гараж автомобильный фирмы К.Л. Крюммеля в Ковенском переулке. 1909 г. Архитектор Я.З. Блувштейн [8]

Fig. 1. Automobile garage of K.L. Krummel's company in Kovensky Street. 1909. Architect Ya.Z. Bluvshstein [8]

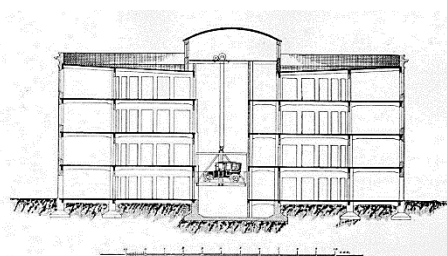
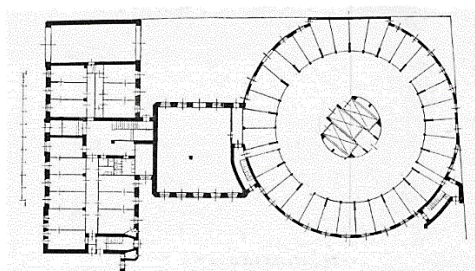


Рис. 2. Гараж автомобильный фирмы К.Л. Крюммеля на Дивенской улице. 1913 г. Архитектор А.В. Болотников²

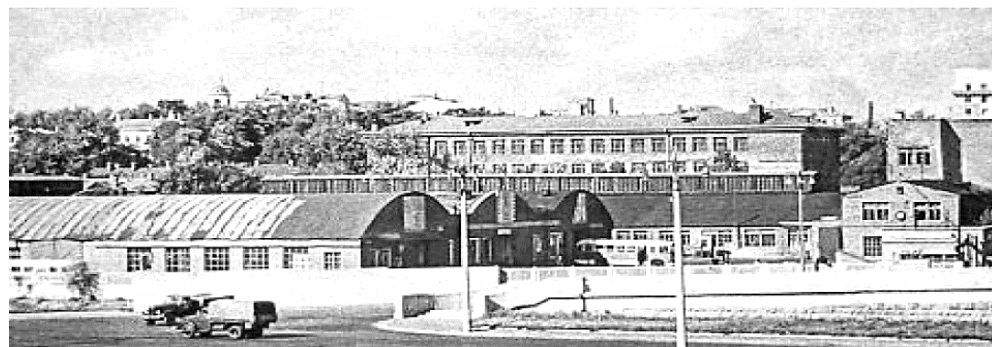
Fig. 2. Automobile garage of K.L. Kryummel company on Divenskaya Str., 1913. Architect A.V. Bolotnikov



² Морозова К. 10 самых интересных старинных петербургских гаражей. URL: <https://www.sobaka.ru/city/city/93159> (дата обращения: 07.12.2022).

Последовавшее за революционными событиями 1917 г. изменение социально-политического устройства страны предопределило радикальную смену принципов и практики архитектурного проектирования объектов обслуживания автомобилей. На смену частному заказчику пришел государственный заказ. После переноса столицы из Петербурга Москва становится городом с активно развивающейся инфраструктурой в сфере обслуживания автомобилей. Меняется структура автотранспорта – персональных автомобилей становится меньше, доминирующую позицию занимают автобусы и грузовые автомобили. Соответственно меняется и заказ на проектирование объектов обслуживания транспорта. Сложная экономическая ситуация, отсутствие собственного автомобильного производства затрудняли поддержание автопарка в исправном состоянии (первое время включавшего преимущественно автомобили бывшего Императорского правительства), низкий ресурс автомобилей того времени – 75 тыс. км, или около 7 лет (согласно исследованиям аналитической компании R.L Polk) – все это требовало больших площадей для технического обслуживания и обширных складских территорий для неисправных единиц техники и ремонтных деталей [8, 9, 10].

Наиболее востребованными становятся автобусные парки с использованием большепролетных конструкций покрытий с учетом габаритов автобусов. Манежного типа автопарки середины 20–30-х гг. XX в. в первую очередь решали задачи хранения дорогих импортных автобусов под кровлей при относительно небольшой территории, занимаемой ремонтными постами (рис. 3, 4) [11].



Автобусный парк на Дружинниковской ул.

Автор проекта инж. П. Д. Моргунов



Фасад гаража

Рис. 3. Дружинниковский автобусный парк, 1928–1931 гг. Архитектор П.Д. Моргунов, инженер Л.Н. Давидович. Фотография 1960-х гг.³

Fig. 3. Druzhinnikovsky bus depot, 1928–1931. Architect P.D. Morgunov, engineer L.N. Davidovich. Photograph of the 1960s

³ URL: www.pastvu.com/_p/a/f/4/d/f4dbe2ad3486b4b552d9bc8ee769f784.jpg



Рис. 4. Автобусный парк на Ордынке, 1926 г. Архитектор М.Е. Приёмывшев⁴

Fig. 4. Bus depot on Ordynka, 1926. Architect M.E. Priyomyshev

Для хранения ведомственного легкового транспорта использовались многоэтажные гаражи с въездной рампой, поскольку применение лифтов представлялось менее эффективным в экономическом и эксплуатационном отношении. Период 1920–30-х гг. представляет несомненный архитектурный интерес и связан с именем К.С. Мельникова. Ему принадлежит авторство целого ряда авангардных проектов гаражей с разработкой новых схем их функционально-планировочной организации (рис. 5–8) [12].

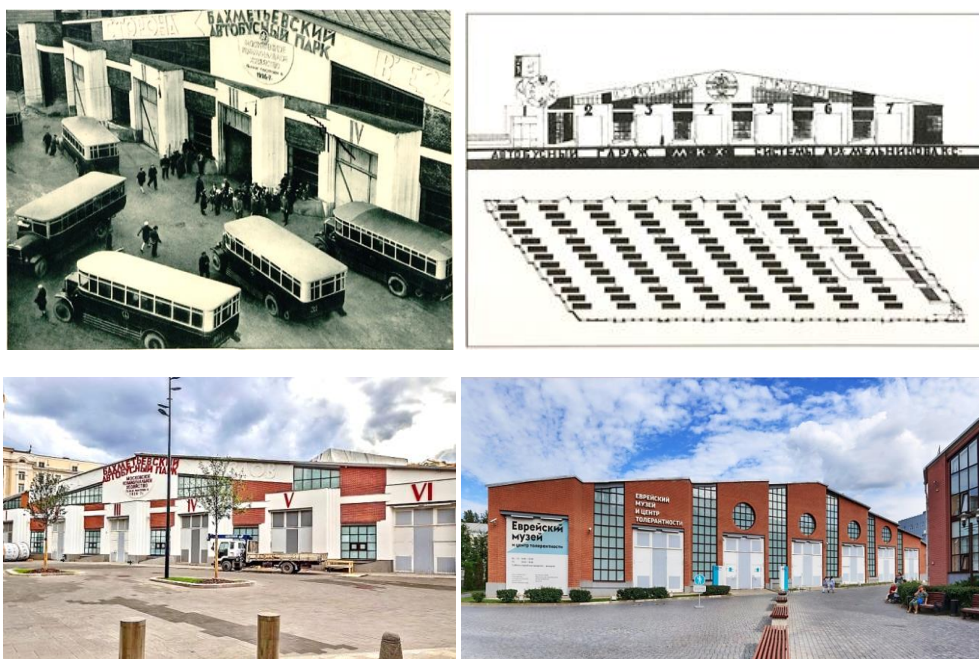


Рис. 5. Бахметьевский автобусный парк. 1927 г. Архитектор К.С. Мельников [12]

Fig. 5. Bakhmetevsky bus depot, 1927. Architect K.S. Melnikov

⁴ URL: <https://pastvu.com/p/418066>

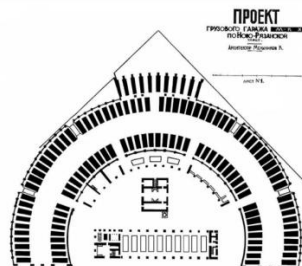


Рис. 6. Гараж на Новорязанской улице. 1929 г. Архитектор К.С. Мельников [12]

Fig. 6. Garage on Novoryazanskaya Street, 1929, Architect K.S. Melnikov



Рис. 7. Гараж Госплана на ул. Авиамоторной. Административный корпус. 1935–1936 гг. Архитекторы: К.С. Мельников, В.И. Курочкин, инженер А.И. Здрок⁵

Fig. 7. Gosplan Garage on Aviamotornaya Street. Administrative building, 1935–1936 Architects K.S. Melnikov, V.I. Kurochkin, engineer A.I. Zdrok

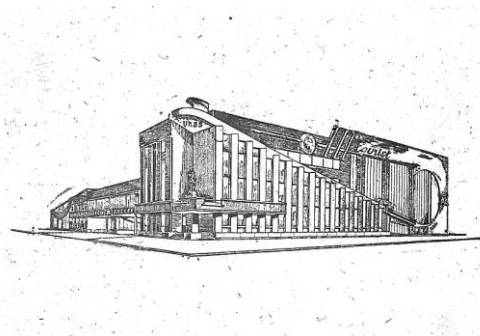


Рис. 8. Гараж «Интуриста». 1932 г. Архитектор К.С. Мельников [12]

Fig. 8. Garage "Intourist", 1932. Architect K.S. Melnikov

⁵ URL: www.pastvu.com

В рассматриваемый временной период данная типология определяла архитектурный, образный и инженерный прогресс молодого государства, в известной мере став его символом и визитной карточкой. В целом довоенный период характеризуется формированием моноблочной структуры манежного (для автобусов) или многоэтажного (для персональных ведомственных автомобилей) стояночного комплекса с зоной технического обслуживания в самом блоке или прилегающих объектах⁶ [13].

В 1926 г. была построена первая автозаправочная станция, что позволило отказаться от газгольдеров и заправочных постов в составе гаражей, повысив уровень их безопасности. Однако массовое распространение АЗС получают ближе к середине 1930-х гг. В 1930 г. появилась первая в СССР станция технического обслуживания автомобилей. Начался процесс вычленения отдельных функционально-технологических элементов обслуживания автомобилей из моноблока гаража. Тем не менее для довоенной отечественной практики была характерна концентрация практически всех видов обслуживания в крупных комплексах автобусных, грузовых, таксомоторных, ведомственных автопарков, рембазах и ремзаводах [14].

Благодаря комплексу технических совершенствований, надёжность конструкции автомобиля к 1930-м гг. позволила существенно сократить количество и площади помещений, необходимых для их обслуживания. При проектировании зданий гаражей стало возможным отказаться от учёта обширного числа складских помещений для хранения запасных частей и инструментов, обеспечить уменьшение площадей ремонтных зон [15].

С открытием в 1929 г. Горьковского автомобильного завода появляются новые массовые модели легковых автомобилей Газ А (с тентовым кузовом, предполагающим гаражное хранение, 1932 г.) и Газ М (с закрытым кузовом, 1936 г.). Техническое состояние новых автомобилей, появление в достаточном количестве и доступе необходимых запасных деталей, развитие технологии производства цельнометаллического кузова, устойчивого к воздействиям окружающей среды, позволившее сократить потребность в большом количестве ремонтных, складских и технических площадей в объёме здания, – все это дало возможность перенести строительство ведомственных гаражей на центральные московские улицы и обеспечить соответствующее их эстетическим требованиям оформление фасадов [9, 16]. Такие здания гаражей могли выходить на красную линию застройки и представляли собой единый многоэтажный комплекс. Основным архитектурным стилем в этот период становится неоклассицизм (рис. 9, 10).

В послевоенный период интенсивное экономическое развитие повлекло за собой процесс модернизации и расширения инфраструктуры транспортных парков общественного и грузового автотранспорта. Дистраиваются объекты, строительство которых было начато в довоенный период, преимущественно выполненные в стиле неоклассицизм. Позднее происходит активное строительство новых объектов для хранения и текущего обслуживания автотранс-

⁶ Российская Федерация. Правительство. Об утверждении границ территорий объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) регионального значения (с изменениями на 8 октября 2019 г.): Постановление Правительства Москвы от 16 марта 2011 г. № 66-ПП.

порта. Для крупноузлового агрегатного и восстановительного кузовного ремонта создавались объекты авторемонтных баз, также занимавшихся обслуживанием служебных легковых автомобилей ведомств, в то время как текущий ремонт и техническое обслуживание этих автомобилей осуществлялись в основном в небольших служебных гаражах [17].

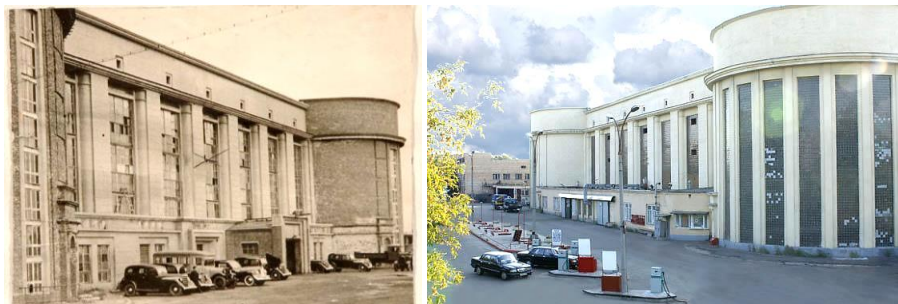


Рис. 9. Гараж Академии наук. 1935 г. Архитектор П.Д. Моргунов, инженер Ю.С. Фельзер⁷
Fig. 9. Garage of the Academy of Sciences, 1935. Architect P.D. Morgunov, engineer Yu.S. Felser



Рис. 10. Гараж ЦИК СССР и ВЦИК (ул. Пресненский вал, д. 9). 1936–1938 гг. Архитекторы: М.А. Минкус, Л.В. Варзар, инженер Л.Н. Давидович⁸
Fig. 10. Garage of the Central Executive Committee of the USSR and the All-Russian Central Executive Committee on (9, Presnensky Val, 1936–1938. Architects M.A. Minkus, L.V. Varzar, engineer L.N. Davidovich

Ярким примером архитектуры данного периода являются проекты ленинградских автобусных парков, большинство из которых связаны с именем архитектора Э.М. Хевелёва. Более поздние здания Киевского автопарка № 7, автобазы обкома КПСС в Санкт-Петербурге и первого в Советском Союзе Василеостровского паркинга служат примером этапа перехода к развитию личного автотранспорта. Данные объекты обладают передовыми конструктивными и архитектурно-планировочными решениями, в которых отражено сочетание манежной структуры здания, большого количества остекления и применение сборных железобетонных конструкций (рис. 11–13).

⁷ URL: <https://wikimapia.org/26797108/ru/%D1%83%D0%BB-%D0%92%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0-21>

⁸ URL: <https://moscowcity.vsedomarossii.ru/en/house/131372>

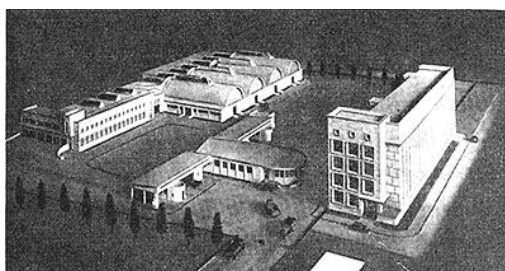


Рис. 11. Здание гаража ЛСПО (Ленинградского совета потребительских обществ). Московский пр., 94/ул. Киевская, 1. 1931 г. Архитектор Э.М. Хевелёв⁹

Fig. 11. Garage of the Leningrad Council of Consumer Societies, 94, Moskovsky Ave., 1931. Architect E.M. Hevelev

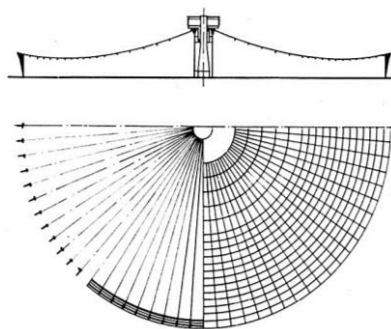
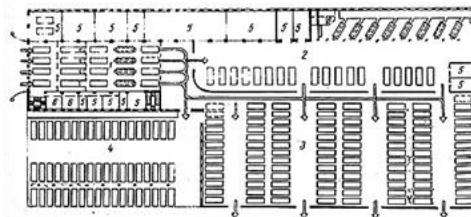


Рис. 12. Киевский автобусный парк № 7. 1973 г. Архитектор В. Зинкевич [17]

Fig. 12. Kiev bus depot N 7, 1973. Architect V. Zinkevich



Рис. 13. Автобусный парк № 5. 1966 г. Архитектор Э.М. Хевелёв¹⁰

Fig. 13. Bus depot No 5, 1966. Architect E.M. Hevelev

⁹ URL: https://ic.pics.livejournal.com/photodeds/88910108/1068009/1068009_original.jpg

¹⁰ URL: <https://www.citywalls.ru/house4752.html?s=9afmeljnpi4levhjpm4dcti05i>

Период 1950–70-х гг. характеризуется ещё большей типологической децентрализацией – становлением типологии станций технического обслуживания (СТО) и появлением разнообразных специализированных мастерских и центров обслуживания автотранспорта. В это же время создаются первые специализированные автомобильные магазины (1948 г. Москва, Бакунинская ул., 21). Массовый персональный автомобиль – главное событие данного временного этапа. Меняются задачи, и модифицируется типология объектов обслуживания – проектируются первые фирменные центры обслуживания и продаж автомобилей, автомобильных заводов ВАЗ и «Москвич». Впервые возникает задача обслуживания не только собственно автомобиля, но и клиентов автоцентров. Осознается необходимость устройства зоны ожидания, демонстрационных залов, магазинов сопутствующих товаров, кафе и т. п. Эта задача, тем не менее, будет решена позднее, в 2000-х гг. с непосредственным массовым распространением дилерских центров.

В советский период значительную часть нагрузки по обслуживанию персональных автомобилей берет на себя частный сектор – появляются мастерские в индивидуальных гаражных боксах. Индивидуальные боксовые, как правило установленные или построенные силами владельцев, гаражи покрывают значительные площади территорий крупных городов. Появляется первый в СССР паркинг – «Васильеостровец». Здания ведомственных гаражей и таксомоторных парков периода постройки 1970–90-х гг. в Москве и Санкт-Петербурге в основном решены в стиле модернизм. Для них характерно выделение функции или обособление места крытой стоянки – паркинга.

Для оценки массовости распространения дилерских центров необходимо учесть количество открывавшихся в советский период СТО и сравнить его с современными показателями. Так, в Москве в 1960 г. было зарегистрировано около 150 тыс. легковых автомобилей, действовало всего семь СТО. В 1972 г. в СССР насчитывалось 694 СТО, из них в России – 240. В 1980 г. – соответственно 1253 и 568 СТО. В наши дни только в Москве насчитывается около 3000 СТО, в России – не менее 13 000. При этом ежегодное увеличение количества предприятий автосервиса составляет 10–15 % [18, 19].

1990-е гг. – время взрывной автомобилизации страны. Зарубежные автомобили различных мировых брендов появились на постсоветском пространстве, существенно изменив типологическую модель инфраструктуры обслуживания автотранспорта. Происходит формирование системы дилерских центров продажи и технического обслуживания автомобилей в связи с повышением его доступности. Интенсивно развивается новый типологический ряд, характерной особенностью которого является функциональная гибридизация, когда элементы обслуживания автомобилей входят в состав крупных торговых, торгово-развлекательных, спортивных и иных центров и типологий. Существенно модифицируется и функционально обогащается различными сервисами обслуживание посетителей этих объектов – появляются зоны ожидания, демонстрационные, административные помещения, выставочные залы для предлагаемого модельного ряда и т. п. Наиболее ярким примером, иллюстрирующим этот процесс, является крупная московская сеть дилерских центров «Авилон». Возвращается потребность в крупных объектах временного и постоянного хранения личного автотранспорта, паркингах, автостоянках и гаражах.

Выводы

Выявлены этапы формирования типологии объектов обслуживания автомобилей в России и СССР: дореволюционный, советский довоенный, советский послевоенный и постсоветский, каждый из которых является архитектурным ответом на основные технологические и социально-экономические запросы времени.

В дореволюционный период сформировалась типология гаража, где в одном объеме или едином комплексе зданий располагались все необходимые элементы инфраструктуры для хранения, заправки и обслуживания автомобиля.

Советский довоенный период характеризуется формированием моноблочной структуры манежного (для автобусов, грузовиков) или многоуровневого стояночного комплекса для персональных ведомственных автомобилей с зоной технического обслуживания в самом блоке или прилегающих объектах и началом отделения в самостоятельные объекты ряда функционально-типологических блоков – АЗС, СТО.

Советский послевоенный период связан с типологической децентрализацией объектов обслуживания автотранспорта, становлением типологии станций технического обслуживания (СТО), появлением разнообразных специализированных мастерских и центров обслуживания автотранспорта и начальным этапом формирования системы обслуживания массового персонального автомобиля.

Постсоветский период – период взрывной автомобилизации страны – формирование системы дилерских центров продажи и технического обслуживания автомобилей. Изменяется типологическая модель инфраструктуры обслуживания автотранспорта, характерной особенностью которой является функциональная гибридизация, когда элементы обслуживания автомобилей, в первую очередь автостоянки, входят в состав крупных деловых, торговых, торгово-развлекательных, спортивных и иных центров и типологий. Существенно модифицируется и функционально обогащается различными сервисами обслуживание посетителей этих объектов – зоны ожидания, демонстрационные залы для предлагаемого модельного ряда и т. п.

Прогресс автотранспорта, начавшийся в конце XIX в., и новизна выдвигаемых этим процессом задач потребовали интенсивного типологического поиска инновационных архитектурных решений. Объекты обслуживания автотранспорта во взаимосвязи с развивающейся автотранспортной сетью с начала XX в. становятся значимыми элементами застройки городов, во многом определявшими их новый облик и образ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Kramer D., Lok B., Krug R.* The evolution of base oil technology. Industry focus // Machinery lubrication. 2003. V. 3. URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/472/base-oil-industry> (дата обращения: 07.12.2022).
2. *Gaffey J.D.* The productivity of labor in the rubber tire manufacturing industry : Thesis (PhD.). Columbia University, 1940. P. 195–199.
3. *French M.* Structural change and competition in the United States tire industry, 1920–1937 // The Business History Review. 1986. V. 60. № 1. P. 28–54. DOI: <https://doi.org/10.2307/3115922>
4. *Шурыгина О.С.* Гаражи Петербурга 1900–1910-х годов. История и архитектура. Москва : Gorkyclassic. 200 с. ISBN 9785990963740.

5. Кириков Б.М. Первые петербургские гаражи // Архитектура Петербурга – Ленинграда: страницы истории. Санкт-Петербург : Коло, 2014. С. 230–247.
6. Кириков Б.М., Штиглиц М.С. Архитектура ленинградского авангарда. Санкт-Петербург : Коло, 2008. 312 с.
7. Шурыгина О.С. Автомобильные гаражи фирмы К.Л. Крюммеля как атрибут модернизации Санкт-Петербурга начала XX века // Архитектурное наследство. Вып. 64. Москва ; Санкт-Петербург : Коло, 2016. С. 222–235.
8. Дмитриев А. Новые московские гаражи // Строительство Москвы. 1930. № 6. С. 14–19.
9. Давидович Л.Н., Климович В.И. Проектирование гаражей. Москва : Гострансхиздат, 1937. 524 с.
10. Gorzelany J. Cars that can last for 250,000 miles (or more). URL: <https://www.forbes.com/sites/jimgorzelany/2015/08/14/cars-that-can-run-for-250000-miles-or-more/?sh=70df6c2c3814> (дата обращения: 07.12.2022).
11. Васильев Н.Ю., Овсянникова Е.Б., Воронцова Т.А., Панин О.А., Туканов А.В., Туканов М.А. Архитектура Москвы периода НЭПа и Первой пятилетки. Путеводитель. Москва : ABC Дизайн, 2014. 328 с. ISBN 978-5-4330-0031-5.
12. Мельников К.С. Архитектура моей жизни. Творческая концепция. Творческая практика / сост. и примеч. А.А. Стригалева, И.В. Коккинаки. Москва : Искусство, 1985. 311 с.
13. Шурыгина О.С. Автомобильный гараж в России 1900–1930-х гг.: от частных боксов к ведомственным комплексам // Архитектура и модернизация. Опыт поздней Российской империи и раннего СССР: 1840–1940-е гг. Москва : РГГУ, 2020. 192 с.
14. Шурыгина О.С. К истории строительства автомобильных гаражей в Москве 1920-х годов // Архитектурное наследство. Вып. 69. Санкт-Петербург : Коло, 2018. С. 185–203.
15. Цветаев В.Д. Автогаражное строительство. Москва : Государственное техническое изд-во, 1931. 387 с.
16. Минкус М.А. Многоэтажные гаражи в СССР // Архитектура СССР. 1940. № 1. С. 9–17.
17. Многоэтажные гаражи // Архитектурная газета. 1939. № 10. С. 4.
18. Хевелёв Э.М. Проектирование городских гаражей. Ленинград : Госстройиздат, 1961. 184 с.
19. Марков О.Д. Станции технического обслуживания автомобилей. Киев : Кондор, 2008. 536 с.

REFERENCES

1. Kramer D., Lok B. Krug R. The evolution of base oil technology. Industry focus. *Chevron Global Lubricants. Machinery lubrication*. V. 3. 2003. Available: www.machinerylubrication.com/Read/472/base-oil-industry (accessed December 7, 2022).
2. Gaffey J.D. The productivity of labor in the rubber tire manufacturing industry. PhD Thesis. Columbia University, 1940. Pp. 195–199.
3. French M. Structural change and competition in the United States tire industry, 1920–1937. *The Business History Review*. 1986; 60 (1): 28–54. DOI: <https://doi.org/10.2307/3115922>
4. Shurygina O. Garages in Saint-Petersburg in 1900–1910. History and architecture. Moscow: Gorkyclassic. 200 p. ISBN 9785990963740. (In Russian)
5. Kirikov B.M. First Saint-Petersburg garages, Architecture of Saint-Petersburg. In: Leningrad: pages of history. Saint-Petersburg: Kolo, 2014. Pp. 230–247. (In Russian)
6. Kirikov B.M., Stieglitz M.S. Architecture of the Leningrad avant-garde. Saint-Petersburg: Kolo, 2008. 312 p. (In Russian)
7. Shurygina, O.S. Automobile garages of Kryummel Company as an attribute of Saint-Petersburg modernization early in the 20th century. *Arkhitekturnoe nasledstvo*. 2016; (64): 222–235. (In Russian)
8. Dmitriev A. New Moscow garages. *Stroitel'stvo Moskvy*. 1930; (6): 14–19. (In Russian)
9. Davidovich L.N., Klimovich V.I. Design of garages. Moscow: Gostranstekhizdat, 1937. 524 p. (In Russian)
10. Gorzelany J. Cars that can last for 250,000 miles (or more). Available: www.forbes.com/sites/jimgorzelany/2015/08/14/cars-that-can-run-for-250000-miles-or-more/?sh=70df6c2c3814 (accessed December 7, 2022).
11. Vasil'ev N.Yu., Ovsyannikova E.B., Voroncova T.A., Panin O.A., Tukanov A.V., Tukanov M.A. Architecture of Moscow during the NEP and the First Five-Year Plan. Guidebook. Moscow: ABC Dizain, 2014. 328 p. (In Russian)

12. *Melnikov K.S.* Architecture in my life. Creative concept. Creative practice. Moscow: Iskusstvo, 1985. 419 p. (In Russian)
13. *Shurygina O.S.* Automobile garage in Russia in the 1900–1930s: From private boxes to department complexes, In: Architecture and modernization. Experience of the late Russian Empire and the early USSR: 1840–1940s. Moscow, 2020. 192 p. (In Russian)
14. *Shurygina O.S.* The history car garages in Moscow in the 1920s. *Arkhiturnoe nasledstvo*. 2018; (69): 185–203. (In Russian)
15. *Tsvetaev V.D.* Auto-garage construction. Moscow, 1931. 387 p. (In Russian)
16. *Minkus M.A.* Multi-storey garages in the USSR. *Arkhitectura SSSR*. 1940; (1): 9–17. (In Russian)
17. Multi-storey garages. *Arkhiturnaya gazeta*. 1939; (10): 4. (In Russian)
18. *Hevelev E.M.* Design of urban garages. Leningrad: Gosstroyizdat, 1961. 184 p. (In Russian)
19. *Markov O.D.* Car maintenance stations. Kiev: Kondor, 2008. 536 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Никишин Сергей Алексеевич, аспирант, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Sergei.7090@mail.ru

Дядченко Сергей Федорович, канд. архитектуры, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 dsf1953@yandex.ru

Сухинина Елена Александровна, канд. архитектуры, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 arx-art-lena@yandex.ru

Authors Details

Sergey A. Nikishin, Research Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politeknicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia, Sergei.7090@mail.ru

Sergey F. Dyadchenko, PhD, A/Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politeknicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia, dsf1953@yandex.ru

Elena A. Sukhinina, PhD, A/Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politeknicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia, arx-art-lena@yandex.ru

Вклад авторов

Никишин С.А. – концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Дядченко С.Ф. – научное руководство; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Сухинина Е.А. – научное руководство; доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Nikishin S.A. conceptualization, methodology, writing – original draft preparation, implications.

Dyadchenko S.F. project administration, methodology, review and editing, implications.

Sukhinina E.A. project administration, review and editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.06.2023
Одобрена после рецензирования 02.10.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 16.06.2023
Approved after review 02.10.2023
Accepted for publication 09.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 44–57.

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 (6): 44–57.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.03+72.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-44-57

EDN: WAPWYF

ОСОБЕННОСТИ ЖИЛОЙ АРХИТЕКТУРЫ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ АСТРАХАНИ

Сергей Александрович Березкин

Санкт-Петербургский государственный

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

Аннотация. Рассматриваются архитектурные особенности исторических жилых зданий Астрахани как ценностные характеристики исторической среды и важная часть идентичности города.

Актуальность выбранной темы обусловлена поиском ценностных характеристик жилых зданий, отражающих самобытность местного архитектурного наследия, для обоснования сохранения исторической застройки Астрахани.

Цель исследования – выявить и систематизировать особенности исторических жилых зданий, построенных до 1917 г.

Методика исследования основана на комплексном анализе исторических жилых зданий Астрахани и систематизации их характерных элементов. Выявление наиболее значимых особенностей производилось на основе описаний города XIX в., заметок историков-краеведов, искусствоведов и архитекторов, сравнительного анализа с особенностями городских домов других региональных центров.

Научная новизна заключается в том, что впервые составлен систематизированный перечень локальных особенностей жилой архитектуры Астрахани с указанием формообразующих факторов.

В результате выявлены особенности исторических жилых зданий Астрахани, сформированные под воздействием природно-климатических факторов, синтеза европейских и восточных архитектурных традиций, экономических и материально-технических возможностей заказчиков.

Ключевые слова: особенности исторических жилых зданий Астрахани, синтез европейских и восточных архитектурных традиций, дворовые галереи, чугунные и кованые балконы, солнцезащитные ставни с жалюзи, пластинный дом

Для цитирования: Березкин С.А. Особенности жилой архитектуры в исторической застройке Астрахани // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 44–57. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-44-57. EDN: WAPWYF

ORIGINAL ARTICLE

RESIDENTIAL ARCHITECTURE IN HISTORIC ENVIRONMENT OF ASTRAKHAN

Sergey A. Berezkin

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

Abstract Purpose: Identification and systematization of historical residential buildings in Astrakhan, built before 1917.

Design/methodology/approach: The comprehensive analysis of historical residential buildings in Astrakhan and systematization of their characteristic elements. Description of the city in the 19th century, notes by local and art historians and architects, comparative analysis of houses in other regional centers.

Research findings: Historical residential buildings in Astrakhan are built under the influence of natural and climatic factors, European and Asian architectural traditions, economic and logistical capabilities of customers.

Practical implications: Historical houses preserve the historic urban environment in order to develop the tourist potential of the Astrakhan region.

Originality/value: For the first time, a systematized list of historical residential architecture in Astrakhan is compiled with the indication of formative factors.

Keywords: residential buildings of Astrakhan, European and Asian architectural traditions, yard galleries, cast and wrought iron balconies, sun-deflecting shutters, plate house

For citation: Berezkin S.A. Residential architecture in historic environment of Astrakhan. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 44–57. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-44-57. EDN: WAPWYF

Введение

В условиях глобализации и нивелирования различий в облике современных городов все большее значение приобретают исторические центры с уникальными объемно-пространственными характеристиками. Выявление и популяризация особенностей местной архитектуры важны не только для развития туристического потенциала, но и для поддержания архитектурной идентичности и сохранения ценных элементов историко-архитектурой среды.

Своеобразие исторических городов проявляется на разных уровнях: от планировочной структуры и силуэтного облика до фасадных элементов и деталей интерьеров. Фокусируясь на объектном уровне, рассмотрим жилые здания, как главный элемент, формирующий застройку исторических кварталов. Специфика астраханских домов в большей степени обусловлена природно-климатическими факторами, взаимовлиянием традиций полиэтнического общества, финансовыми возможностями домовладельцев и доступностью строительных материалов.

Формулировки отдельных особенностей были даны в предшествующих трудах и научных статьях. Московский искусствовед В.П. Никитин, описывая здания эпохи классицизма по «образцовым» проектам, отмечал: «Эти аккурат-

ные двухэтажные домики с желто-белыми фасадами в три, пять, а то и в семь окон располагаются подчас рядом друг с другом. Удачно согласуясь между собой, они составляют неповторимый колорит старых астраханских улиц. <...> Обилие воды в городе еще больше усиливает очарование старой архитектуры набережных. <...> За компактными каменными домиками рядовой застройки следует уютный деревянный особняк с мезонином в три окна» [1, с. 40, 41]. Историк архитектуры А.И. Власюк писал, что жилая архитектура Астрахани – «это в большинстве своем здания с массивными кирпичными стенами и богатым декоративным убранством, представляющим собой различные сочетания узоров кирпичной кладки» [2, с. 226]. Концентрируя свое внимание на зданиях второй половины XIX в., исследователь связывает стилевую направленность с местными архитектурными традициями и ориентацией на древнерусское зодчество (детали фасадов сооружений Астраханского Кремля). Из современных работ выделим диссертацию и научную статью Н.В. Тиняевой. Кандидат архитектуры выделяет четыре элемента жилой среды (на уровне владельческого участка): 1) закрытое пространство – двор; 2) полужакрытое пространство – галереи или террасы; 3) открытое пространство – двор; 4) входная зона. Выявляя особенности каждого элемента, Наталия Владимировна указывает, что «в условиях южного быта двор – жизненно необходимая среда не только для общения с соседями, но также для создания благоприятных микроклиматических условий. <...> Климатические особенности заставили астраханцев обратиться к восточным традициям, и дворы стали довольно закрытыми. Несмотря на моду на различные европейские стили XVIII–XIX вв., дворы продолжали сохранять закрытый характер, обращенный внутрь» [3, с. 8].

Цель настоящего исследования – выявить и систематизировать особенности жилой архитектуры в исторической застройке Астрахани. Объектом исследования являются жилые здания и домовладения, построенные в XIX – начале XX в. Под *исторической застройкой* понимается планировочный каркас и архитектурно-пространственная ткань центра города, а также совокупность недвижимых объектов, созданных до января 1918 г. (год революционных столкновений в Астрахани).

Общие особенности жилой архитектуры Астрахани

На градостроительном уровне ценной характеристикой жилой застройки является историческая парцелляция кварталов и формирование обособленного дворового пространства. Во времена Российской империи в системе имущественного права и налогообложения фиксировали не отдельные дома, а владельческие участки со всеми зданиями на них. Поэтому при анализе стоит учитывать не только главные дома, но и все флигели, хозяйственные корпуса и пространственные характеристики внутреннего двора с исторической преемственностью повседневного бытования. Торговый город диктовал потребности богатых купцов и рыбопромышленников, которые и были основными владельцами каменных домов и крупных комплексов городских усадеб. В первую очередь выделяются торгово-промышленные корпуса, примыкающие к главному дому. Например, симметрично-фланкирующие угловой дом здания торговых лавок купца М.Г. Алабова (сохранилось только одно по адресу: ул. Коммуни-

стическая, 20, лит. «Б») и П-образно выстроенные корпуса домовладения Качаковых (сохранились частично, ул. Ленина, 18 / ул. Бабушкина, 15, лит. «Б»). Хозяйственная специфика рыбного края требовала наличия на территории участка специальных построек или помещений для сушки и хранения засоленной рыбы, так называемые *вешала*. Чаще всего их устраивали на антресольных этажах флигелей и служб с характерными жалюзи для проветривания.

Особенности исторической застройки также проявляются в масштабе и объемно-пространственных характеристиках жилых зданий. Выявлено, что до 1917 г. были наиболее распространены одноэтажные деревянные и каменные дома, двухэтажные каменные, полуквадратные и деревянные дома. Только к началу XX в. доходные дома стали возводить в три этажа (ул. Никольская, 6; ул. Советская, 21; ул. Свердлова, 5; ул. Бабушкина, 70; ул. Свердлова, 41; ул. Свердлова, 23), и максимальная высота в четыре этажа была достигнута в доме Е.Г. Агамжановой (ул. Никольская, 5). При формировании парадного облика домовладения по уличному фронту самым распространенным стало решение фасада дома с примыкающими въездными воротами. Поскольку главный дом чаще всего располагался вдоль одной из границ межевания с соседним участком, то ворота с оградой могли доходить до другой границы или располагаться между главным домом и флигелем. На рубеже XIX–XX вв. плотность застройки участка резко увеличивается, поэтому дома занимали всю ширину участка с проездовой аркой по центральной оси или со стороны брандмауэра дома.

По планировочной конфигурации можно выделить дома «глаголем». Ранний пример Г-образного в плане жилого дома был выявлен в проекте губернского архитектора А.П. Дигби для штаб-офицеров Астраханского порта [4]. Основные жилые комнаты расположены в прямоугольном объеме, выходящем парадным фасадом с воротами на улицу. Вглубь участка по границе уходит объем подсобных и хозяйственных помещений (людской, кухни, чулана, бани). Отдельным корпусом в глубине участка запроектировано размещение конюшни, ледника с амбаром. Такая конфигурация плана могла формироваться и с течением десятилетий, когда к компактным прямоугольным домам первой половины XIX в. пристраивали со двора дополнительные корпуса для увеличения полезных площадей. Во второй половине XIX в. Г-образные в плане дома могли не примыкать к границе соседнего участка, что обнаружено в городских усадьбах С.М. Лионозова и И.В. Меркульева.

Отметим, что исторически в жилых домах Астрахани разного типа никогда не устраивали мансардные этажи с характерными окнами, которые можно наблюдать в доходных домах Санкт-Петербурга. Кровельное покрытие в первой половине и середине XIX в. выполнялось из керамической черепицы или теса, в последующие периоды начинают использовать металлические листы с фальцевым соединением.

Главная особенность жилой архитектуры Астрахани проявилась в особом объемно-планировочном решении домов с дворовыми галереями. Помимо жаркого климата на это повлияло расположение города на границе Европы и Азии в месте пересечения торговых путей. Огромные гостиные дворы, введенные в XVII в. в центре города для русских и иноземных купцов, в начале XIX в. сменили частные гостиные дома. Государственное требование к обли-

ку фасадов по «образцовым» проектам в классицистическом стиле и восточные традиции обособленного бытования иностранных купцов создали квинт-эссенцию двух культур. Владельческий участок застраивался периметрально каменными корпусами в два этажа, на первом этаже размещались лавки, в полуподвале – складские помещения, а на втором этаже ячейками располагались жилые комнаты. Закрытый внутренний двор окружен открытой галереей, что создавало тень и комфортный микроклимат во время летнего зноя.

Наиболее интересные и характерные примеры расположены на ул. Советской. Гостиный дом под № 9 был построен в самом начале XIX в. по заказу Кирилла Федорова. Впечатляют декоративное оформление уличных фасадов в формах позднего классицизма и внутренний двор «на азиатский манер». Этот же прием был использован в доме на ул. Советской, 10. Двухэтажное здание, выходящее на три улицы, с двумя мезонинами и одной проездной аркой было построено к 1852 г. персидским купцом Аджи Усейновым. Восточную атмосферу внутреннего двора подчеркивают открытые галереи с полукруглыми проемами каменных аркад. Подобное решение с национальными мотивами и отсылкой на старинные караван-сарай использовалось и в более поздних домовладениях богатейшей семьи Усейновых (например, в доме по ул. Казанской, 72, где галереи уже были встроены в объем здания, но сохранили полукруглые проемы).

С более просторным внутренним двором и открытыми галереями был выстроен дом на ул. Свердлова, 39, известный как доходный дом семьи Агамжановых и датируемый 1820-ми гг. Ретроспективным воплощением подобного типа стал доходный дом Я.И. Абкарова, созданный в ходе реконструкции 1912 г. с символической надписью на центральном глухом парапете: «Никольское подворье». В определенной степени гостиные дома первой половины XIX в. стали переходным типом и предтечей доходных домов Астрахани последующих периодов.

Дворовые галереи

Самые яркие особенности жилых зданий Астрахани были обусловлены природно-климатическими факторами. В объемно-планировочном решении это были уже упомянутые *галереи*. Старший врач при заведении Астраханского приказа общественного призрения Ф.-И.М. Ольдекоп отмечал, что «галереи встречаются здесь так часто и составляют такую прямую потребность, обусловливаемую климатом, что нет почти дома, не исключая малейшей избушки, где бы не было галереи; они помещаются всегда со стороны двора, и дома, галереи которых обращены к северу, обыкновенно предпочитаются квартирантами за их прохладу. <...> Галереи эти очень просторны, и в жаркое время года в них проводится все время: здесь принимают визиты, обедают и даже спят» [5, с. 412]. Галерея становится буферной зоной для создания комфортного микроклимата между закрытыми помещениями и открытым дворовым пространством владельческого участка. Границами этой зоны являются несущие стены здания и опорные столбы со стороны двора. Дополнительное остекление галерей добавляло зданию большую целостность и формировало более четкую границу между двумя пространствами. В галереях также размещались средства вертикальной коммуникации – лестницы. Насы-

щенная динамика формировала и коммуникативную активность в социокультурном взаимодействии. Помимо проведения общего досуга и общения жители использовали площади галерей как место хранения, поэтому до сих пор в домах можно увидеть огромные сундуки и старинные шкафы.

Несмотря на то, что деревянные галереи были давней традицией жилого строительства на юге Российской империи и в Астрахани достоверно фиксируются в нескольких домах последней четверти XVIII в. [6], официальное их утверждение было осуществлено в начале 1820-х гг. В 1820 г. поднимается вопрос о дополнении «образцовых» проектов с учетом природно-климатических условий Астраханской губернии. По представлению астраханского гражданского губернатора главноуправляющий в Грузии, Астраханской и Кавказской губерниях, генерал от инфантерии А.П. Ермолов начинает переписку с Министерством внутренних дел для разрешения солнцезащитных пристроек, поясняя, «что в защиту от больших жаров, бываемых в Астрахани, и сильного действия солнечных лучей тамошние жители имели издавна обыкновение строить дома свои с галлереями, над лавками делали навесы» [7, л. 2]. Здесь впервые фиксируется упоминание о региональной особенности местного домостроения и архитектуры. Таких решений не было в «образцовых» альбомах, разосланных по городам в 1810 г., поэтому для Астрахани было выполнено шесть рисунков, а после обсуждений и внесения исправлений одобрены проекты архитектора И.И. Шарлеманя [7, л. 6, об. 13]. В архивном деле этих чертежей не осталось, но в качестве примера были вложены фасады домов «на азиатский манер» для Таврической губернии – четыре листа архитектора А.И. Мельникова [7, л. 15–18]. Таким образом, на государственном уровне решались архитектурно-строительные вопросы о синтезе европейского классицизма и местных традиций «в азиатском вкусе».

Дворовые галереи пристраивались к одной стене основного объема здания (со стороны двора или сбоку, прикрывая пространство галереи «образцовой декорацией» со стороны улицы) или примыкали к периметральной застройке, окружая внутренний двор (рис. 1, а, б, в). Очень редко галереи окружали дом с трех сторон (рис. 1, в), как в главном доме наследников Н.А. Бекетова (ул. Набережная 1 Мая, 150, лит. «А») или уже в 1870-е гг. в деревянном особняке купца Г.В. Тетюшинова. В первой половине и середине XIX в. оформление несущих столбов решалось в ордерной традиции в виде колонн тосканского ордера (рис. 2, а). В двухэтажных домах деревянные колонны всегда располагались на уровне второго этажа, опираясь на кирпичные столбы. Широкое использование тиражированных элементов (капителей, баз и фустов колонн) помогает в атрибуции «безымянных» исторических зданий, позволяя выявить архитектурное наследие эпохи «образцового» классицизма. В последующие десятилетия при активном развитии кирпичного производства галереи стали приобретать разнообразные решения: на кирпичных столбах в один или два этажа (рис. 2, б), с полукруглыми и лучковыми проемами (рис. 2, в, в). При уплотнении застройки участков на рубеже XIX – начале XX в. галереи стали не только примыкать к основному зданию, но и входить в основную объемно-планировочную структуру дома (с парадными лестницами) или выходить во двор на консольных опорах.

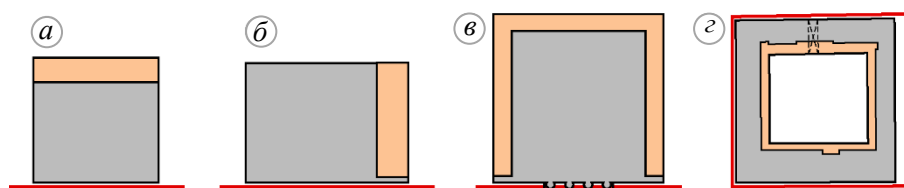


Рис. 1. Варианты примыкания галереи к основному объему жилого дома. Схематичные чертежи С.А. Березкина:

a – вдоль фасада со стороны двора; *б* – к боковому фасаду; *в* – П-образно с трех дворовых фасадов; *г* – периметрально к фасадам вокруг внутреннего двора (у гостиных и доходных домов по типу караван-сарая)

Fig. 1. Gallery connections to a residential building. Schematic drawings by S. Berezkin:
a – along facade from yard side; *b* – to side facade; *c* – U-shaped three yard facades; *d* – perimetrically to facades around courtyard (revenue houses by caravanserais type)

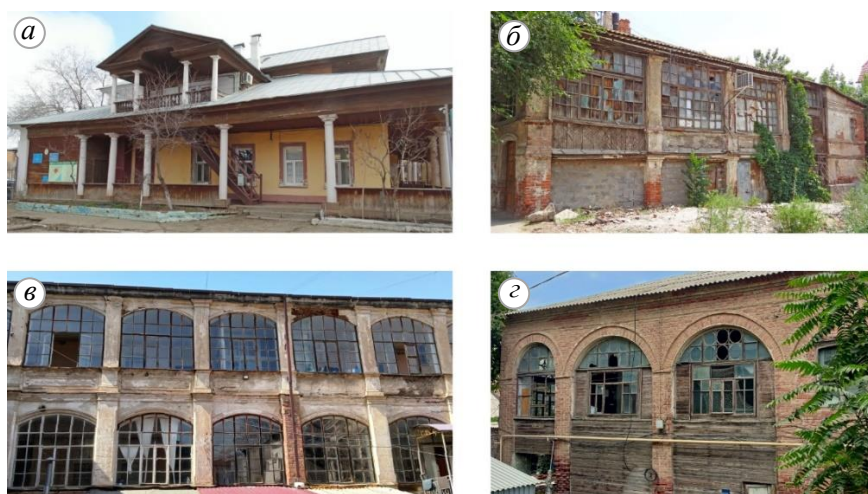


Рис. 2. Виды архитектурно-конструктивного решения дворовых галерей в Астрахани. Фото С.А. Березкина, 2022 г.:

a – с деревянными колоннами тосканского ордера; *б* – на кирпичных столбах; *в* – в виде дополнительной стены с лучковыми перемычками; *г* – стена с полукруглыми проемами

Fig. 2. Architectural and constructive solutions of yard galleries in Astrakhan. Photograph by S. Berezkin:

a – with wooden columns of the Tuscan order; *b* – on brick pillars; *c* – additional wall with arched lintels; *d* – wall with semicircular openings

Помимо открытых галерей террасного типа, часто пространство между деревянными колоннами или кирпичными столбами в верхней части стеклили, что формировало веранды, которые становились местом летнего досуга. Нижняя часть всегда была глухой и с фасада в 1830–50-е гг. иногда декорировалась точеными полубалясинами. Особый интерес представляет рисунок переплетов галерейных окон. Часто это были вполне рациональные, классицистические расстекловки с прямоугольной сеткой (рис. 3, *a*) или веерным расположением в полуциркульных фрамугах (ул. Набережная 1 Мая, 139) (рис. 3, *б*). Однако и здесь появились варианты с восточными мотивами. Ритмический ряд пере-

плетов в уровне фрамуги был оформлен в виде килевидной арки, которая использовалась в одном из проектов А.И. Мельникова «на азиатский манер». Подобная расстекловка галереи была в доме Саградова (ул. Набережная, 1 Мая, 151), сохранилась в домах по ул. Казанской, 37 (рис. 3, в), ул. Куйбышева, 41, пл. Шаумяна, 26. Активный демонтаж подлинных столярных изделий в памятниках архитектуры и исторических зданиях лишает нас важных деталей историко-архитектурной среды города, что не дает возможности дальнейшего анализа по достоверным материальным источникам.

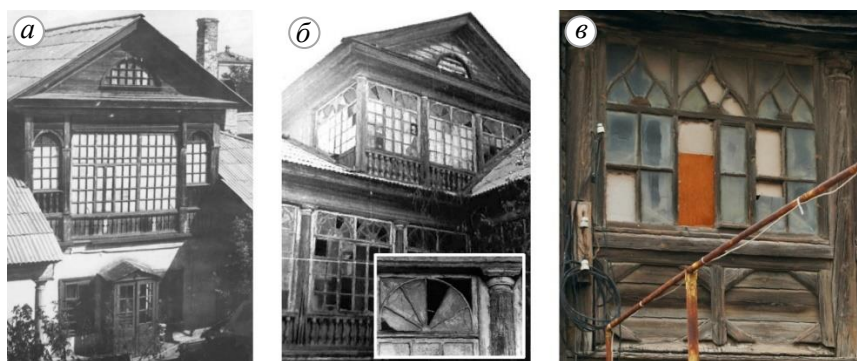


Рис. 3. Виды рисунков переплетов галерейных окон:

а – прямоугольная сетка (ул. Набережная 1 Мая, 150). Фото 1980 г. из фондов Государственного архива Астраханской области (ГААО. Ф. Р-1760. Оп. 102. Д. 1. Л. 31); б – с веерным расположением в полуциркульных фрамугах (ул. Набережная 1 Мая, 139). Фото из паспорта памятника архитектуры 1975 г.; в – с фрамугами в виде килевидной арки (ул. Казанская, 37). Фото С.А. Березкина, 2021 г.

Fig. 3. Drawings of gallery window frames:

a – rectangular grid (150, Naberezhnaya 1 Maya). Photograph of 1980 from the State Archive of the Astrakhan Region; b – with fan arrangement in semicircular transoms (139, Naberezhnaya 1 Maya). Photograph from the monument of architecture passport of 1975; c – with transoms in the form of keeled arch (37, Kazanskaya Street). Photograph by S. Berezkin

Характерные элементы фасадов исторических домов

Еще в 1844 г. русский публицист и общественный деятель И.С. Аксаков, находясь в Астрахани в числе чиновников ревизионной комиссии под руководством князя П.П. Гагарина, писал: «Астрахань совсем не похожа на прочие губернные города: она больше их и имеет свой самобытный характер. <...> груды домов астраханской архитектуры – все с балконами, балкончиками и галереями...» [8, с. 23, 64]. Так была выявлена еще одна особенность – это астраханские балконы, которые получили широкое распространение на парадных фасадах домов и добавляли объемную пластику и эффектные тени в солнечные дни. Часто балконы располагали над главным входом, что решало проблему навеса в дождливую погоду.

В эпоху классицизма на парадных фасадах каменных домов Астрахани балконы не устраивали (за исключением дома губернатора), но у деревянных домов с мезонинами (в основном на берегу Варвациевского канала) они были в соответствии с «образцовыми» проектами. В советский период несущие

консольные балки и деревянные ограждения были утрачены. Широкое применение художественного металла пришло во второй половине XIX в. В 1870–90-е гг. новые кирпичные дома стали возводить с чугунными балконами двух типов: на кронштейнах и опорных столбах.

К первой группе относятся: доходный дом Х.Г. и И.Г. Сергеевых (ул. Бурова, 4; сохранились только кронштейны); дом купца Н.И. Яковлева (ул. Фиолетова, 15; сохранилось ограждение и только один кронштейн), особняк Гулюмовых (ул. Набережная 1 Мая, 101), особняк И.В. Меркульева (ул. Свердлова, 37), дом купцов Воробьевых (ул. Адмиралтейская, 48), доходный дом А.А. Тавризова (ул. Никольская, 6), особняк Х.Е. Ефремова (ул. Красная Набережная, 11). Литые опоры консольного типа выделяются ажурными силуэтами с барочными, флористическими и зооморфными мотивами. Особенно впечатляют закрученные спирали из листьев и цветов с головой мифического существа.

Балконы второй группы поддерживают с двух сторон металлические колонки, а конструкцию площадки закрывают декоративные чугунные полосы в несколько уровней, напоминающие подзоры в деревянном зодчестве. Это балкон-навес петербургского типа, который имел большой вынос и перекрывал пространство тротуара перед входом [9]. Наиболее интересны конструкции с парными опорами, связанными в средней части дополнительными элементами в виде торшеров для светильников с ажурным орнаментом. Сохранившиеся образцы расположены по следующим адресам: ул. Урицкого, 9 (дом М.Ф. Федорова), ул. Лейтенанта Шмидта, 4 (доходный дом И.И. Кононова), ул. М. Горького, 53. На основе исторических фотографий было выявлено, что такие же опоры балконов существовали у особняков С.М. Лионозова (ул. Набережная 1 Мая, 47), С.Г. Сундукова (ул. В. Третьяковского, 15). Балконами были оформлены углы дома Кононовых (ул. Коммунистическая, 14) и доходного дома П.И. Коржинского (ул. Красная Набережная, 9), но были демонтированы в советский период по разным причинам. Небольшие балконы с одиночными колоннами с двух сторон обнаружены у домов по адресам: ул. Никольская, 13; ул. Эспланадная, 29; ул. Свердлова, 18.

В конце XIX – начале XX в. происходит трансформация опорных элементов балконов. На смену мощному чугунному литью приходят легкие кованые кронштейны и ограждения, чаще всего с флоральными и триумфальными мотивами. Из растительных орнаментов, помимо изгибов и завитков, выделяются чеканные цветы, у которых из середины чашечки выходят спирально завитые железные усики (так называемый узор *Agut*). Примером служит балкон жилого дома по ул. Красная Набережная, 50. Однако большее распространение получили чеканные цветы на конце главной спирали с раскрытыми лепестками. Подобным образом украшены кронштейны балконов доходного дома Г.М. Мелькумова (ул. Калинина, 25). Тема венков и гирлянд связана с неоклассицизмом и ампириными символами. Ярким примером служит ограждение балкона дома на ул. Коммунистической, 29.

Изящные кованые кронштейны в большей степени выполняли декоративную роль, а несущими элементами были консольные металлические балки, закрепленные в кирпичную кладку фасадной стены. Поэтому некоторые балконы выполнялись без визуальных опор, с устройством балконной плиты из

дерева или бетона с кирпичным щебнем. Интересной особенностью является то, что несущие консоли балконов – это рельсы (рельсовый прокат). Связано это со строительством железной дороги Рязанско-Уральской линии до Астрахани и внутригородских трамвайных маршрутов в начале XX в., таким образом конструкции транспортной инфраструктуры начали использовать и для гражданского строительства.

По клеймам на чугунных опорах балконов и парадных лестницах исторических домов было выявлено, что металлические изделия заказывали у саратовских заводов А.В. Чирихиной, В.С. Парусинова, В.К. Малышкина. Также в конце XIX в. появляются местные чугунно-литейные заведения Д.И. Красавина, Д.А. Митрофанова и П.С. Янчикова. Кованые металлические решетки изготавливали астраханские кузнецы: И.Ф. Баткаев, Д.Н. Безумнов, Г.Е. Игнатов, Х.Ф. Иртуганов, А.Ф. Сорокин, В.М. Суплатов, династия Давлеткамовых и др.

Солнцезащитные решения проявились в деревянных ставнях и фрамугах с жалюзи перед оконными рамами. Изменение угла наклона деревянных пластин жалюзи посредством металлической фурнитуры позволяло регулировать уровень освещенности внутренних помещений. Почтовые фотокарточки второй половины XIX – начала XX в. с видами города показывают, что практически все оконные проемы жилых домов были закрыты таким образом. В последние десятилетия в процессе ремонтов и установки современных систем регулирования температурного режима подобные ставни стремительно демонтируют. Среди памятников жилой архитектуры центральной части города жалюзи еще можно фрагментарно увидеть на фасадах доходного дома на ул. Кирова, 28; дома А.И. Жильцовой (ул. Красная Набережная, 50) (рис. 4, а); доходного дома Ф.И. Полякова (ул. Свердлова, 53; в уровне первого этажа, где размещается музей Велимира Хлебникова) (рис. 4, б); доходного дома А.И. Дворецкого (ул. Свердлова, 41) (рис. 4, в), доходного дома П.Г. Никифорова (ул. Молодой Гвардии, 7). Детали, обусловленные природно-климатическими факторами, являются важными особенностями региональной архитектуры и нуждаются в обязательном сохранении.



Рис. 4. Солнцезащитные ставни с регулируемы жалюзи на фасадах исторических домов. Фото С.А. Березкина:

а – ул. Красная Набережная, 50; б – ул. Свердлова, 53; в – ул. Свердлова, 41

Fig. 4. Sun-deflecting shutters with regulated louvers on facades of historic houses. Photograph by S. Berezkin:

a – 50, Krasnaya Naberezhnaya Street; b – 53, Sverdlov Street; c – 41, Sverdlov Street

Конструктивные особенности деревянных домов

Природные условия Нижнего Поволжья также влияли на выбор строительного материала. Здесь не было своего строительного леса, поэтому бревна сплавляли по реке из северных губерний (Нижегородской, Казанской и т. д.). Несмотря на это, вплоть до середины XX в. застройка Астрахани была преимущественно деревянной. Древесину использовали в качестве основного конструктивного остова (в виде сруба), балок перекрытия каменных домов, для внешней и внутренней отделки, для покрытия крыши (что по противопожарным нормам не поощрялось). Во второй половине XIX в. доставка и продажа пиломатериалов стали более совершенными, что способствовало обновлению и увеличению частного жилого фонда. Средством для сплава строительного леса-полуфабриката стали беляны – огромные плоскодонные барки, груженные бревнами, досками и даже готовыми домами. После вывоза продукции деревянный остов судна также разбирался на стройматериалы. Главным складом и местом торговли стала северо-западная часть Закутумья по берегам Волги и Большой Болды, где появились лесные пристани и лесопильные заводы. В этом же районе разместили и бондарный поселок, в котором многочисленные ремесленники создавали бочки для нужд рыбной и соляной промышленности.

В целях экономии строительного материала круглые бревна распиливали на *пластины*, которые монтировали в традиционный сруб. Некоторые здания оставляли без отделки, в результате чего оконные короба выделялись большим выносом, что также является особенностью жилых домов как средство защиты от палящего солнца. Большой эффект таким «окнам на выносе» добавляют архитектурно оформленные кронштейны, как у дома на ул. Казанской, 44. Другие дома утепляли древесными стружками и зашивали тесом. Однако часто для создания представительного облика уличного фасада владельцы заказывали облицовку кирпичом с декоративными деталями. Для надежности в качестве дополнительного крепления кирпичной кладки к деревянному каркасу использовали кованые гвозди, шляпки которых можно обнаружить на некоторых фасадах (например, у домов по ул. Бакинской, 4 и ул. Красная Набережная, 61). Многочисленные сносы и радикальные реконструкции исторических жилых зданий в последние годы демонстрируют большой процент такой конструктивной системы в квартальной застройке города до 1917 г.

Важным аспектом является точная формулировка термина для обозначения рассматриваемой конструкции. В современной архитектурно-строительной практике используют понятие «лафет» – бревно, отесанное с двух сторон [10, с. 137]. В астраханском лексиконе такое бревно называют *пластиной*, поэтому в краеведческой литературе было введено понятие «пластинный дом» [11, с. 24; 12, с. 63]. При изучении деревянного зодчества Астрахани рекомендуется использовать местные устоявшиеся названия.

Толщина пластин в домах более зажиточных горожан могла достигать до 25 см. В срубе венцы устанавливали друг на друга «в обло» с остатком, иногда дополнительно укрепляли соединение шипами. Припасовку бревен делали горбом вверх. Помимо угловых выступов из плоскости стены выходили торцевые части балок перекрытия, что можно увидеть в жилых домах, оставшихся без

дополнительного утепления и отделки. Щели между бревнами конопатили, снаружи стены красили, а внутри отделывали гипсом. Фундамент таких домов был ленточным из кирпичной кладки или в виде отдельных кирпичных столбов, на которые укладывались венцы (такая конструкция была выявлена в одноэтажном доме с мезонином на ул. Набережная 1 Мая, 25). Бедные горожане старались на всем экономить, поэтому толщина пластин в их одноэтажных домах редко превышала 5 см, что снижало несущую способность сруба и теплоизоляционные свойства. Часто такие строения возводили без фундамента, поэтому период эксплуатации заканчивался достаточно быстро, несмотря на попытки укрепления и утепления. В большей степени до наших дней сохранились двухэтажные деревянные дома с пластинным срубом (рис. 5). Однако были варианты полукаменных домов, у которых верхний этаж был из деревянных пластин (например, дом Г.А. Кривоногова, построенный в 1914 г.).



Рис. 5. Модель двухэтажного пластинного дома с боковой галереей (в качестве прототипа был выбран дом на ул. Зои Космодемьянской, 106). Выполнено С.А. Березкиным

Fig. 5. Model of two-storey plate house with side gallery (106, Zoya Kosmodemyanskaya Street house chosen as a prototype). Created by S. Berezkin

Выводы

Таким образом, были выявлены градостроительные, объемно-пространственные, планировочные, конструктивные и архитектурно-художественные особенности жилой архитектуры в исторической застройке Астрахани.

1. Преобладание малоэтажных домов, расположенных на владельческих участках, преимущественно в один и два этажа с разрывами по уличному фронту вдоль красных линий в виде въездных ворот. Для конца XIX – начала XX в. характерна плотная жилая застройка с протяженными фасадами домов вдоль красных линий с брандмауэрами на границах домовладений и проездными арками во внутренний двор.

2. Для исторических домовладений Астрахани большое значение имели не только парадные фасады по уличному фронту, но и дворовое пространство, которое сочетало хозяйственную и рекреационную функции.

3. Дворовые галереи как буферное пространство между жилыми помещениями и внутренним двором для создания комфортных условий в жарком

климате представляют особую историко-культурную ценность: в них размещали лестницы, жители хранили здесь в сундуках личное имущество и проводили совместный досуг. По фасадным решениям галереи делятся на открытые или застекленные верандного типа с деревянными колоннами, кирпичными столбами или с большими оконными проемами внешней стены.

4. Синтез европейской и восточной традиций привел к формированию местных архитектурных приемов и форм, таких как:

- уличные фасады в общеевропейском стиле и внутренний двор по типу восточного караван-сарая;
- в галереях на «азиатский манер» вместо простых столбов использовали ордерную систему в виде колонн тосканского ордера;
- рисунок переплетов галерейных окон: с прямоугольной сеткой (европейский вариант) или в форме килевидной арки в уровне фрамуги («на азиатский манер»).

5. Характерные элементы фасадов жилых зданий, связанные с природно-климатическим факторами:

- оконные ставни с регулируемыми деревянными жалюзи;
- оконные коробки с сильным выносом;
- балконы с большим выносом, площадки на кронштейнах, опорных столбах или консолях из трамвайных рельсов.

6. Распространение конструктивной системы в виде деревянного пластинного сруба без отделки, с обшивкой тесом или с парадным фасадом из кирпичной кладки (деревянный дом, обложенный кирпичом).

Вышеозначенные архитектурные решения и элементы представляют особую ценность исторической среды Астрахани, отражают местную идентичность и рекомендуются к включению в предмет охраны как отдельных памятников жилой архитектуры, так и достопримечательных мест и исторического поселения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никитин В.П. Астрахань и ее окрестности. Москва : Искусство, 1981. 152 с.
2. Власюк А.И. О своеобразии архитектуры русских провинциальных городов в 1840–1910-е годы // Памятники русской архитектуры и монументального искусства. Стиль, атрибуции, датировки. Москва : Наука, 1983. С. 222–261.
3. Тиняева Н.В. Структура жилой среды г. Астрахани // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2014. № 2. С. 4–11.
4. План и фасад на построение вновь в Астраханском Порте для жилья шести штаб-офицеров шесть деревянных домов со службами одинакового расположения на каменном фундаменте, расположенным в одном квартале. 1802 г., архитектор Александр Дигби // Российский государственный архив Военно-Морского Флота (РГАВМФ). Ф. 326. Оп. 1. Д. 1607.
5. Ольдекоп Ф.М. Медико-топография города Астрахани и его ближайшей окружности: старшего врача Астраханской городской больницы, доктора медицины Ольдекопа // Медико-топографический сборник с картами, планами, графическими таблицами и рисунками в тексте / под ред. С. Ловцова. Санкт-Петербург, 1870. Т. 1. С. 301–720.
6. Березкин С.А. Жилая архитектура последней четверти XVIII века в Астрахани // Архитектон: известия вузов. 2023. № 2 (82). URL: http://archvuz.ru/2023_2/9/ (дата обращения: 17.07.2023).
7. Дело о дозволении в Астрахани для защиты от жаров пристраивать к домам галлерей и над лавками делать навесы. 1820–1821 гг. // Российский государственный исторический архив (РГИА). Ф. 1285. Оп. 8. Д. 1678.

8. Аксаков И.С. Письма к родным: 1844–1849. Москва : Наука, 1988. 704 с.
9. Красносельская Н.Ю. Развитие петербургского типа чугунного балкона-навеса в постройках других городов второй половины XIX – начала XX века // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. статей XIV Международной научно-практической конференции. Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. С. 173–180.
10. Бодэ А.Б., Зинина О.А. Традиционные русские плотницкие технологии. Работа с деревом, конструкции, архитектура. Москва : Институт Наследия, 2016. 142 с.
11. Лосев Г.А., Кирокосьян М.А. Астраханские словечки. Астрахань : Чилим, 2007. 260 с.
12. Таркова Р.А. Астрахань: традиции мастеров. Астрахань : ООО «Портал», 2021. 372 с.

REFERENCES

1. Nikitin V.P. Astrakhan and its surroundings. Moscow: Iskusstvo, 1981. 152 p. (In Russian)
2. Vlasyuk A.I. Original architecture of Russian provincial cities in the 1840s –1910s. In: Monuments of Russian architecture and monumental art. Style, attribution, dating. Moscow: Nauka, 1983. Pp. 222–261. (In Russian)
3. Tinyaeva N.V. The structure of the residential environment of Astrakhan. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*. 2014; 2 (8): 4–11. (In Russian)
4. Russian State Archive of the Navy. Form 326. List 1. File 1607. 1802.
5. Oldekop F.M. Medico-topography of Astrakhan and its nearest surroundings. In: Medical and topographic collection with maps, plans, graphic tables and drawings in the text, Vol. 1, Saint-Petersburg, 1870. Pp. 301–720. (In Russian)
6. Berezkin S.A. Residential architecture late in the 18th century in Astrakhan. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2023; 2 (82). Available: http://archvuz.ru/en/2023_2/9/ (accessed July 17, 2023). (In Russian)
7. Russian State Historical Archive. Form 1285. List. File 1678. 1820–1821. (In Russian)
8. Aksakov I.S. Letters to relatives: 1844–1849. Moscow: Nauka, 1988. 704 p. (In Russian)
9. Krasnoselskaya N.Yu. The development of the St. Petersburg type cast-iron balcony-canopy in buildings of other cities in the 19th and early 20th century. In: *Proc. 14th Int. Sci. Conf. 'Modern Research: Relevant Problems, Achievements and Innovations'*, Penza, 2020. Pp. 173–180. (In Russian)
10. Bode A.B., Zinina O.A. Traditional Russian carpenter's techniques. Woodwork, structures, architecture. Moscow, 2016. 142 p. (In Russian)
11. Losev G.A., Kirokosyan M.A. Astrakhan words. Astrakhan: Chilik, 2007. 260 p. (In Russian)
12. Tarkova R.A. Astrakhan: Traditions of masters. Astrakhan: Portal, 2021. 372 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Березкин Сергей Александрович, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, berezkin.s.official@gmail.com

Author Details

Sergey A. Berezkin, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, berezkin.s.official@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.08.2023
Одобрена после рецензирования 08.11.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 31.08.2023
Approved after review 08.11.2023
Accepted for publication 09.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 58–67.

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 (6): 58–67.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721.05

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-58-67

EDN: XMSGOE

КОНЦЕПТ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭКСТЕРЬЕРА И ИНТЕРЬЕРА ЗДАНИЙ

Петр Андреевич Пылов¹, Анна Владимировна Дягилева¹,
Евгения Александровна Николаева¹, Роман Вячеславович Майтак¹,
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 статьи обусловлена растущим количеством интегрируемой в повседневную жизнь человека техникой: жилище человека всё чаще именуется «умным домом». Одним из элементов этой системы управления являются роботы-пылесосы, которые выполняют очистку различных поверхностей. Трудности, с которыми сталкивается подобная техника, во многом зависят от определения препятствий и конфигурации объекта, в котором она находится.

Целью настоящего исследования является разработка концепта сверточной нейронной сети, которая позволит в режиме реального времени отличать интерьер здания от его экстерьера.

Выводы. Построение интеллектуальной системы, самостоятельно отличающей интерьер здания от его экстерьера, во многом повысило бы производительность программно-аппаратного комплекса современной техники бытового и промышленного сегментов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, архитектура зданий

Для цитирования: Пылов П.А., Дягилева А.В., Николаева Е.А., Майтак Р.В., Шалыгина Т.А. Концепт сверточной нейронной сети для классификации экстерьера и интерьера зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 58–67. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-58-67. EDN: XMSGOE

ORIGINAL ARTICLE

CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR BUILDING EXTERIOR AND INTERIOR CLASSIFICATION

Petr A. Pylov¹, Anna V. Diagileva¹, Evgeniya A. Nikolaeva¹,
Roman V. Maitak¹, Tayana A. Shalygina²

¹Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

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

Abstract. Purpose: The concept development of convolutional neural network for real-time distinguishing between building interior and exterior.

The relevance of the topic of the scientific article is determined by the technology integration into everyday life. Houses are increasingly referred to as a smart house. One of the elements of this control system, is robot vacuum cleaner, which cleans various surfaces. Difficulties encountered by such a technique largely depend on the environment definition, in which it is located.

The intelligent system can independently distinguish between building interior and exterior, thereby greatly increasing the performance of the firmware complex of modern technology in both domestic and industrial segments.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, architecture

For citation: Pylov P.A., Diagileva A.V., Nikolaeva E.A., Maitak R.V., Shalygina T.A. Convolutional neural network for building exterior and interior classification. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 58–67. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-58-67. EDN: XMSGOE

Жизнь современного человека ассоциируется с большим городом, отличительными символами которого являются здания и сооружения. Здания отличаются друг от друга не только внешним оформлением, но и внутренним убранством, однако все они созданы человеком.

Очевидно, что чем сложнее устроено здание, тем тяжелее поддерживать его в исправном состоянии, поэтому с ростом темпов цифровой трансформации инженеры нашли применение автоматизирующих ресурсов информационных технологий и к объектам архитектуры. Так, существуют роботы, выполняющие уборку зданий с внешней стороны, разработан также другой тип машин – для клининга внутренних помещений. В первом приближении в этом примере всё логично и правильно: чтобы очищать здания извне, требуется один инструмент, а для выполнения внутренней уборки следует применять уже другие средства очистки. На практике всё оказывается более прозаичным и однотипным: конструкция подобных роботов практически идентична, а разница в средствах очистки легко может быть нивелирована при использовании особой технологической конструкции для подачи очищающих средств [1]. Проблема унификации зиждется на значительно меньшем остоле, чем это предполагалось изначально, – программный комплекс роботов столкнулся с проблемой дихотомической классификации интерьера и экстерьера здания [2]. При условии решения этой проблемы остальные сложности решаются сами собой: роботы уже имеют запрограммированную процедуру для выполнения очистки зданий, но первона-

чально им необходимо знать, в каком месте пространства (относительно здания) они находятся.

Решение данной задачи можно было бы найти на основе системы глобального спутникового позиционирования GPS, однако даже оптимальные условия оставляют погрешность географической позиции в 2 м [3]. Отечественная система спутникового позиционирования «Глонасс» оставляет за собой право погрешности в 1,3 м [4], что лишь немногим лучше GPS. С точки зрения позиционирования на открытой местности и прокладывания маршрутов передвижений эта погрешность является незначительной, но когда вопрос касается зданий, то даже 30 см часто могут привести к диаметрально противоположным результатам: либо робот будет находиться по одну сторону стены (в помещении), либо по другую сторону стены (снаружи здания). Этот несложный пример является исключаящим обстоятельством для разрешения проблемы однозначного определения местоположения относительно здания на основе спутниковых навигационных систем.

Теоретически определить текущее местоположение относительно здания робот может при помощи встроенной фотокамеры [5]. Однако в таком случае придется решить нестандартную для методов прямого программирования задачу определения класса местонахождения (снаружи здания или внутри него) по фото. У информатики есть методы и для подобного класса задач, которые принято именовать творческими [2]. С творческими задачами хорошо справляются модели машинного и глубокого обучения, которые могут самостоятельно определять взаимосвязи в данных и решать задачи, ранее считавшиеся исключительно прерогативой человека [6].

Решить поставленную задачу можно на основе сверточной нейронной сети, т. к. такой класс интеллектуальных моделей отлично зарекомендовал себя применительно к анализу изображений: сверточные нейросети позволяют абсорбировать информацию в графических данных, позволяя с высокой прецизионностью решать поставленную перед ними прикладную задачу классификации [2].

В рамках настоящей статьи рассматривается прикладная задача бинарной классификации, для которой будет разработана собственная архитектура модели глубокого обучения. Логика этой модели представлена на рис. 1.

В качестве основы для построения модели глубокого обучения всегда выступает набор данных предметной области, для которой автоматизируется решение практической задачи. Рассматриваемая в рамках данной статьи проблема касается любого типа зданий, поэтому чем больше изображений сможет проанализировать модель, тем точнее она будет функционировать в других исследовательских и практических проектах. Основой для формирования базы изображений стал сервис, который хранит в себе более ста миллионов снимков интерьера и экстерьера различной недвижимости [7].

Реализованная авторами данной статьи архитектура нейронной сети (рис. 2) позволяет модели глубокого обучения выявлять на снимках зданий высокоуровневые (рис. 3), среднеуровневые (рис. 4) и низкоуровневые (рис. 5) особенности изображения, что многократно повышает точность модели и её правильную работоспособность на новых фотографиях.

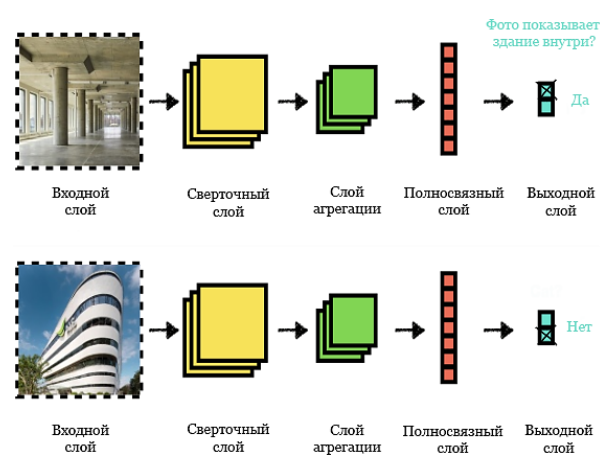


Рис. 1. Логика построения модели сверточной нейронной сети для классификации местонахождения относительно здания (изнутри или снаружи). Изображение реализовано при помощи программного продукта Adobe Photoshop 2022

Fig. 1. The logic of constructing a convolutional neural network model for classifying the location relative to the building (inside or outside). The image is implemented using the Adobe Photoshop 2022

Model: "sequential_2"

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d_6 (Conv2D)	(None, 126, 126, 32)	896
activation_10 (Activation)	(None, 126, 126, 32)	0
max_pooling2d_6 (MaxPooling2)	(None, 63, 63, 32)	0
conv2d_7 (Conv2D)	(None, 61, 61, 32)	9248
activation_11 (Activation)	(None, 61, 61, 32)	0
max_pooling2d_7 (MaxPooling2)	(None, 30, 30, 32)	0
conv2d_8 (Conv2D)	(None, 28, 28, 64)	18496
activation_12 (Activation)	(None, 28, 28, 64)	0
max_pooling2d_8 (MaxPooling2)	(None, 14, 14, 64)	0
flatten_2 (Flatten)	(None, 12544)	0
dense_4 (Dense)	(None, 64)	802880
activation_13 (Activation)	(None, 64)	0
dropout_2 (Dropout)	(None, 64)	0
dense_5 (Dense)	(None, 1)	65
activation_14 (Activation)	(None, 1)	0

Total params: 831,585
Trainable params: 831,585
Non-trainable params: 0

None

Рис. 2. Подробная архитектура разработанной сверточной нейронной сети (с учетом количества параметров на каждом слое). Изображение получено в рамках вывода структуры модели глубокого обучения на основе программной библиотеки Keras

Fig. 2. Detailed architecture of the developed convolutional neural network (taking into account the number of parameters on each layer). The image is obtained as part of the structure output of the deep learning model based on the Keras software library

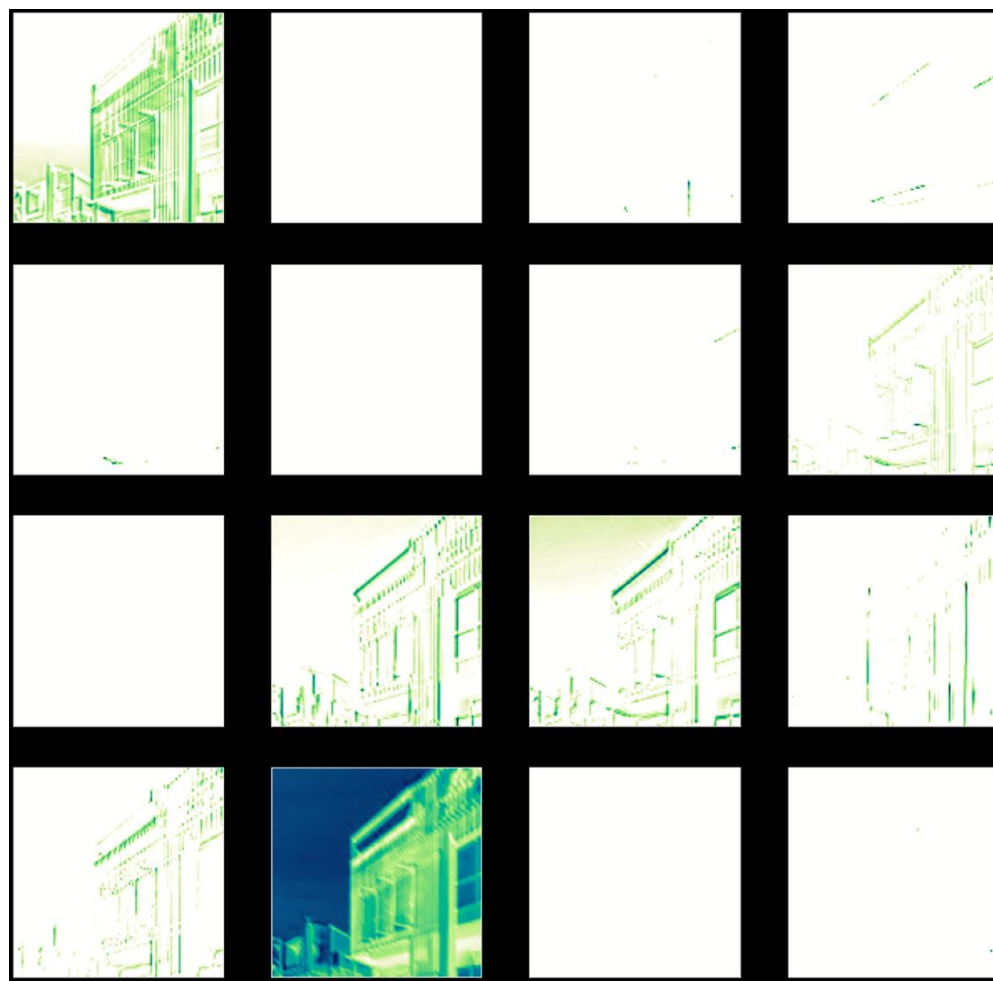


Рис. 3. Обработка высокоуровневых признаков фотографии моделью сверточной нейронной сети. На обособленных частях изображения хорошо заметен эффект обобщения моделью очертаний объектов (признаки высокого уровня)

Fig. 3. Processing of high-level features of photograph by the convolutional neural network model. Generalization of the object outlined by the model (high-level features), is clearly visible on the isolated parts of the image

На основе многоуровневого анализа модель сверточной нейронной сети принимает итоговое значение, которое существенно превосходит по показателю точности традиционные модели глубокого обучения [6]. В первую очередь это связано с последовательной обработкой изображения по разным критериям, в то время как стандартные методы прикладного искусственного интеллекта анализируют лишь картинку в целом, не углубляясь в её детали. Также необходимо отметить, что стандартная архитектура позволяет работать лишь со снимками, размеры которых совпадают по ширине и длине (квадратные изображения). В современной фототехнике в подавляющем большинстве в качестве стандарта де-факто и базовой конфигурации снимка используется соот-

ношение сторон 16:9, что исключает возможность применения традиционных моделей прикладного искусственного интеллекта [8]. Разработанная модель сверточной нейронной сети позволяет анализировать фотографии с любым соотношением сторон, что дает ей неоспоримое преимущество в прикладном применении перед аналогами.



Рис. 4. Обработка признаков среднего уровня. На данном этапе обобщающая способность модели сосредоточена на отнесении набросков объекта изображения к конкретному типу части здания (определении местонахождения снимка: извне или снаружи)

Fig. 4. Processing of average-level features. Generalizing ability of the model is focused on attributing sketches of the object to a specific part of building (determining the location of the image: outside or outside)

После завершения процесса обучения точность модели сверточной нейронной сети (см. рис. 1) составила 92,03 %. Без интерпретации этой точности было бы сложно судить о том, как именно функционирует разработанная

модель глубокого обучения, поэтому проанализируем ответы модели на тестовых образцах (рис. 6, 7).

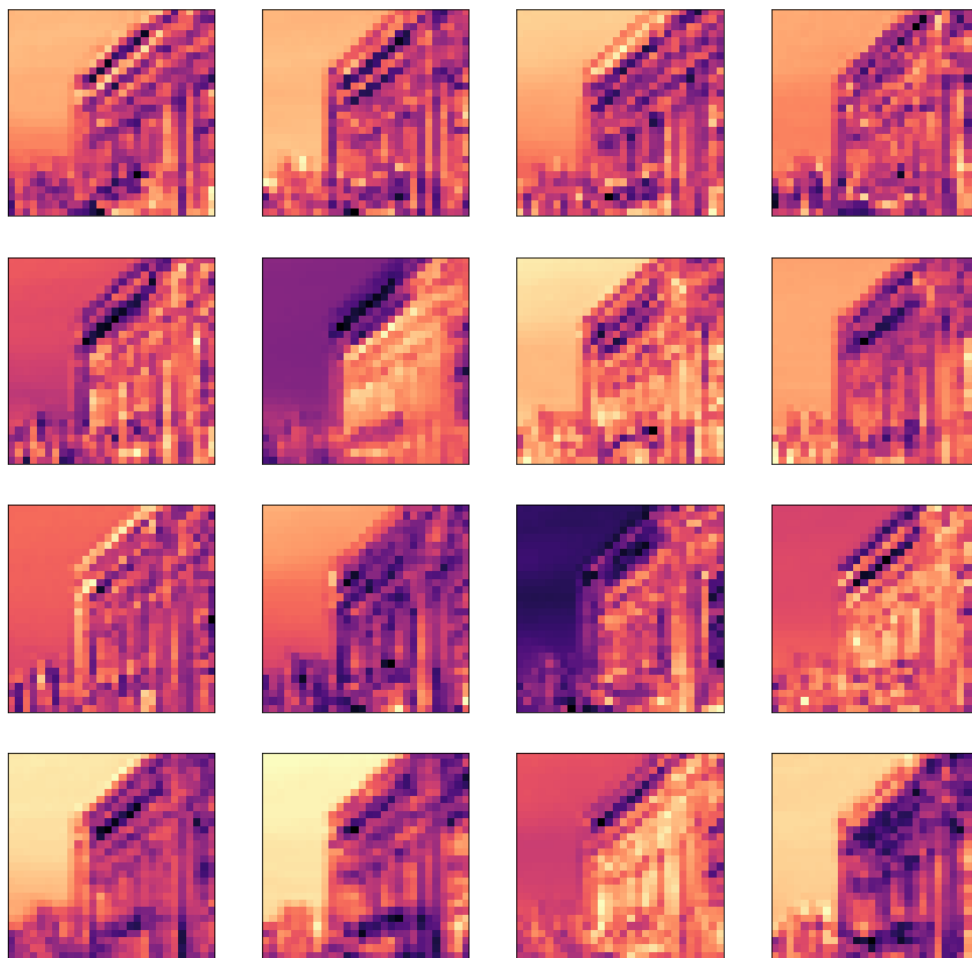
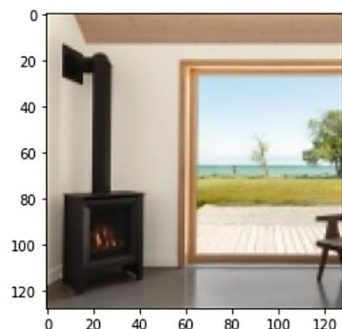


Рис. 5. Обработка низкоуровневых признаков. Сверточная нейронная сеть исследует мельчайшие детали на уровне пикселей изображения, чтобы максимально удостовериться в правильности выбора конечного класса

Fig. 5. Processing of low-level features. Convolutional neural network examines the smallest details at the pixel level in order to make sure that the final class is selected correctly as much as possible

Согласно данным интерпретации (рис. 6, 7), разработанное программное представление сверточной нейронной сети может стать полноценной интеллектуальной моделью для решения прикладных задач в области распознавания интерьера и экстерьера сооружения, т. к. прецизионность превышает установленный показатель точности (75 % и более) для интеграции прикладных автоматизирующих моделей, основанных на методах прикладного искусственного интеллекта [2, 8].

Предсказанное значение точности для класса изображения: 0.00078649512
Фактический класс исследуемого изображения: 0



Предсказанное значение точности для класса изображения: 0.00078349215
Фактический класс исследуемого изображения: 0

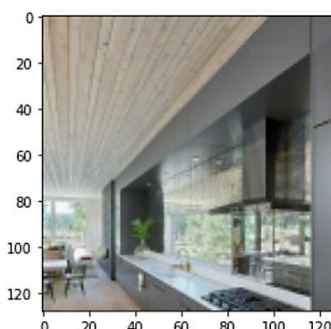
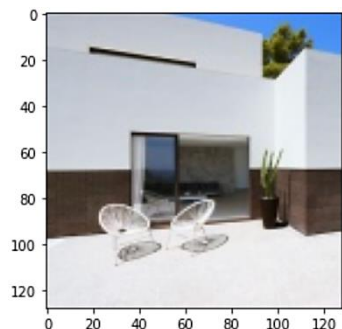


Рис. 6. Предсказание целевого класса моделью сверточной нейронной сети на примере внутренней стороны здания (значение «внутри» должно быть равно 0). После выполнения округления прогнозный класс будет совпадать с фактическим

Fig. 6. Prediction of the target class by the convolutional neural network model inside the building (the value "inside" equals 0). After rounding, the forecast class will match the actual one

Предсказанное значение точности для класса изображения: 0.9947740
Фактический класс исследуемого изображения: 1



Предсказанное значение точности для класса изображения: 0.9999724
Фактический класс исследуемого изображения: 1

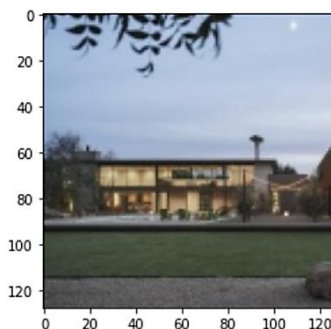


Рис. 7. Предсказание целевого класса моделью сверточной нейронной сети на примере внешней стороны здания (значение «снаружи» должно быть равно 1). После выполнения округления прогнозный класс будет совпадать с фактическим

Fig. 7. Prediction of the target class by the convolutional neural network model of the building (the value "outside" equals 1). After rounding, the forecast classes match the actual one

Выводы

Разработанное программное решение может служить программной базой для унификации промышленных и бытовых роботов, осуществляющих уборку зданий и помещений, поскольку тем самым решается задача распознавания среды нахождения объекта – это стало возможным благодаря применению прикладного решения на базе сверточной нейронной сети.

Достичь такой точности во многом удалось благодаря реализации многоуровневой архитектуры анализа изображений, которая позволяет сегментировать признаки различной иерархии (верхней, средней и низшей). Рассмотр-

ренный выше подход дает возможность получить высокую точность разрабатываемого решения и устойчивую правильную классификацию новых образцов данных.

Авторская архитектура модели глубокого обучения, представленная в рамках настоящей статьи, позволяет не только унифицировать решение, но и применять его в других смежных задачах, поэтому функционал разработанной программы может быть перенесен в среду разработки других языков программирования и успешно применен другими исследователями для решения иных проблем, связанных с архитектурой зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Smith J.* Cleaning robots: technology, trends, and future perspectives. ABC Press, 2021. 250 p.
2. *Kopec D.* Classic computer science problems in Python. Manning Shelter Island, 2019. 201 p.
3. *Leick A.* GPS Satellite Surveying. Wiley, 2019. 688 p.
4. *Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P.* Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration. Wiley, 2013. 608 p.
5. *Doe J.* Robots in cleaning: principles and applications. XYZ Publishers, 2022. 320 p.
6. *Wolohan J.T.* Mastering large datasets with Python. Manning Press, 2019. 365 p.
7. *Кастл Р.* Ежедневная архитектура в фотографиях. 2023. URL: https://www.archdaily.com/?ad_name=small-logo (дата обращения: 30.05.2023).
8. *Abrahams S., Hafner D.* TensorFlow for machine learning intelligence. Bleeding Edge Press, 2019. 245 p.

REFERENCES

1. *Smith J.* Cleaning robots: Technology, trends, and future perspectives. ABC Press, 2021. 250 p.
2. *Kopec D.* Classic computer science problems in Python. Manning Shelter Island, 2019. 201 p.
3. *Leick A.* GPS Satellite Surveying. Wiley, 2019. 688 p.
4. *Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P.* Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley, 2013. 608 p.
5. *Doe J.* Robots in cleaning: Principles and applications. XYZ Publishers, 2022. 320 p.
6. *Wolohan J.T.* Mastering large datasets with Python. Mannig Press, 2019. 365 p.
7. *Castle R.* Daily architecture in photos. 2023. Available: www.archdaily.com/?ad_name=small-logo (accessed May 30, 2023).
8. *Abrahams S., Hafner D.* TensorFlow for machine learning intelligence. Bleeding Edge Press, 2019. 245 p.

Сведения об авторах

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

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

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

Майтак Роман Вячеславович, магистрант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, superenergy@mail.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, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, gedrosten@mail.ru

Anna V. Dyagileva, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, dyagileva@mail.ru

Evgenia A. Nikolaeva, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, nikolaevaea@yandex.ru

Roman V. Maitak, Graduate Student, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, super-energy@mail.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 10.10.2023
Одобрена после рецензирования 26.10.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 10.10.2023
Approved after review 26.10.2023
Accepted for publication 09.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 68–77.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 68–77.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 728.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-68-77

EDN: ZYCMYE

ФОРМИРОВАНИЕ СЕЛЬСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОВРЕМЕННОГО ЛЕВОБЕРЕЖЬЯ САРАТОВСКОГО ПОВОЛЖЬЯ (ВЗАИМООБМЕН РАЗЛИЧНЫХ КУЛЬТУР)

Егор Витальевич Рыбалкин

*Саратовский государственный технический университет
им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия*

Аннотация. В статье рассмотрен исторический процесс формирования региональной сельской архитектуры на территории современной Саратовской области на примере крестьянской усадьбы.

Актуальность исследования определяется малой степенью изученности взаимообмена приёмами архитектуры между переселенцами на территории Саратовского Левобережья. Автором рассматриваются вопросы сложившихся традиций строительства, места бытования и обмена элементами архитектуры.

Теоретической основой исследования являются труды историков и краеведов, приведенных в библиографическом списке статьи, а также авторские натурные исследования.

Практическая значимость работы заключается в выявлении своеобразности сложившейся архитектуры в сёлах переселенцев. Полученные сведения идентифицируют архитектуру Саратовского Поволжья среди многообразия архитектуры регионов Нижней Волги в архитектурном и этнографическом аспекте.

Научная новизна исследования заключается в изучении обмена архитектурными элементами и приёмами строительства между переселенцами, сформировавшими региональную архитектуру в левобережной части Саратовского Поволжья на рубеже XIX–XX вв.

Результаты. Выделены две соседствующие группы переселенцев, составляющие основное население левобережья в период XVIII – начала XX в. Обозначены сходства и различия в устройстве крестьянской усадьбы между переселенцами. Выявлены принципы образования и места распространения различных приёмов декоративной отделки.

Ключевые слова: архитектура Саратовского Поволжья, немецко-малороссийские переселенцы, сельское строительство, взаимообмен в архитектуре, формирование традиционной архитектуры

Для цитирования: Рыбалкин Е.В. Формирование сельской архитектуры центральной части современного левобережья Саратовского Поволжья (взаимообмен различных культур) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 68–77. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-68-77. EDN: ZYCMYE

ORIGINAL ARTICLE

**RURAL ARCHITECTURE OF THE LEFT BANK
OF SARATOV VOLGA REGION
(INTERCHANGE OF DIFFERENT CULTURES)****Egor V. Rybalkin***Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia*

Abstract. The article examines the historical rural architecture on the territory of the modern Saratov region using the example of a peasant estate. Two neighboring groups of settlers are identified, who made up the main population of the left bank in the 18th and early 20th centuries. Similarities and differences are indicated for the structure of peasant house. The principles of formation and places of distribution of various decorative finishing techniques are identified.

Purpose: The aim of this work is to identify ways and means of forming traditional architecture on the left bank of the Saratov Volga region.

Design/methodology/approach: Field research, the analysis of works of historians and local historians, critical analysis of archive documents and literature review.

Practical implications: Identification of exclusivity of the historically developed architecture of villages. Information obtained identifies the architecture of the Saratov Volga region among the diversity of architecture of the Lower Volga regions in architectural and ethnographic aspects.

Value: The study of the regional architecture formation. The study of works of historians and local historians.

Keywords: architecture, Saratov Volga region, rural construction, German-Little Russian settlers, architecture exchange, traditional architecture

For citation: Rybalkin E.V. Rural architecture of the left bank of Saratov Volga region (interchange of different cultures). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 68–77. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-68-77. EDN: ZYCMYE

Введение

В настоящее время отсутствуют исследования сельской архитектуры, позволяющие отразить особенности массовой застройки Саратовского Поволжья. Поскольку регион Саратовского Поволжья представляет собой многонациональную и многокультурную совокупность, то рассматривается левобережье центральной части региона с четко выраженной типичной архитектурой для всех сёл Саратовского Поволжья.

Центральная часть левобережья современной Саратовской области в середине XVIII в. была освоена переселенцами из Европы и Малороссии. Вследствие тесного расположения переселенческих сёл и регулирующей роли государства к концу XIX в. сформировались новые национальные группы, отличные от своих первоначальных корней. Благодаря торгово-экономическим отношениям среди переселенческих групп происходили пересечения культур.

В статье «Исследования российско-немецкой сельской архитектуры: историографический обзор» научным сотрудником ИЛЭТ СО РАН А.Ю. Охотниковым подтверждается малоизученный вопрос о пересечении культур среди российских немцев и других народов Нижнего Поволжья [1]. Также профессором кафедры филологии СГУ Г.Г. Дингенсом в 20-х гг. XX в. были изучены диалекты поволжских немцев и сделаны выводы о лингвистических изменениях под влиянием соседствующих народов [2].

Следовательно, можно выдвинуть гипотезу: если были изменения в языковой среде, то также могли происходить влияния и заимствования и в архитектуре. Причём архитектурные влияния могли носить характер взаимообмена между переселенцами, что в целом сформировало архитектуру левобережья центральной части Саратовского Поволжья.

Территория центральной части левобережья представляет преимущественно малороссийско-немецкую этноконтактную зону, где сложились благоприятные условия для прямых контактов. Вероятность процессов пересечения зависела от характера расселения малороссов и немцев, уровня компактного или рассредоточенного расположения поселений, национальной государственной политики.

В конце XIX в. национальная обособленность была выражена сильнее в периферийных сёлах округа или волости, когда каждая группа малороссов или немцев жила компактно и взаимодействовала только со своей национальной группой (рис. 1). Отношения между населением ближайших малороссийских и немецких сёл на всей территории обследования в большинстве случаев были дружественными. Между селениями существовали торгово-экономические связи, ими обычно были охвачены все ближайшие села округа. Кроме того, торгово-экономические связи пересекались в узловых центрах, которые также способствовали обмену техникой строительства среди населения.

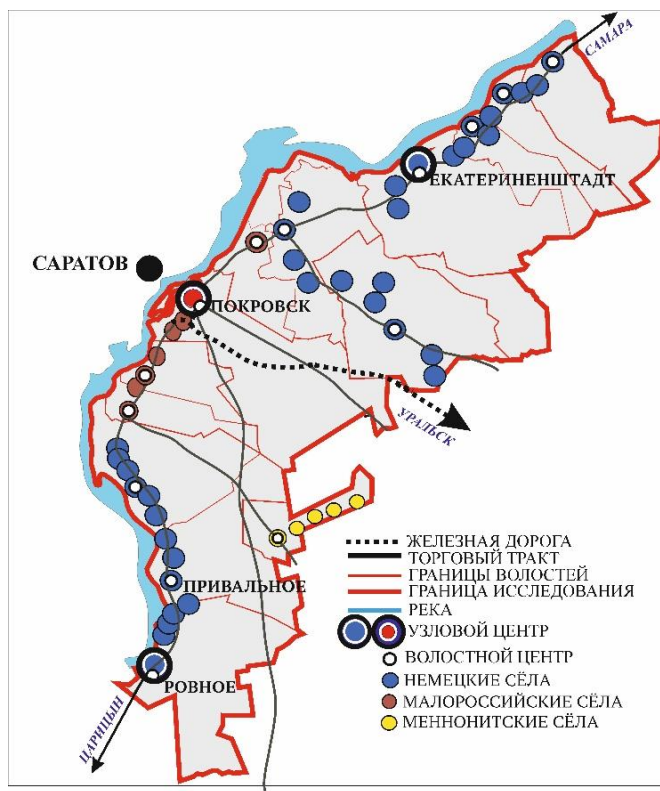


Рис. 1. Расположение сёл левобережья на период XIX–XX вв. Выполнено автором по материалам натурного исследования

Fig. 1. Location on villages of the left bank in the 19-20th centuries. Performed by author

Узловыми центрами являются крупные села с волостным правлением, развитой административной, фабричной и торговой функцией. В работе «Поселения немцев в России. Архитектурный феномен» С.О. Терёхиным в левобережье отмечались два торгово-промышленных узла: Привально-Ровенский и Екатериненштадтский [3]. Автором выделяется 3-й центр, образованный в малороссийской Покровской слободе. Выявление Покровской слободы объясняется также наличием пристаней, фабричного производства и административной функции [4]. Являясь центром сосредоточения разных функций, узловой центр объединял соседние с ним волости (рис. 2).

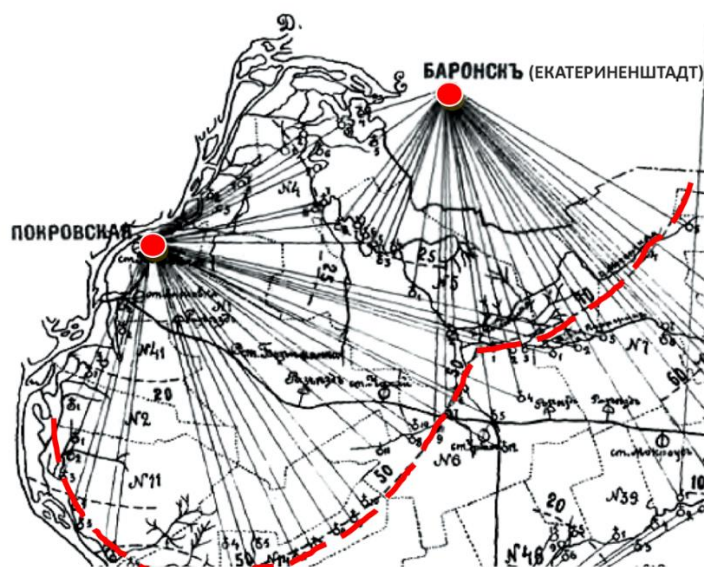


Рис. 2. Фрагмент схемы расположения хлебных рынков и районов их влияния [5] (красным пунктиром обозначены границы зон влияния узловых центров)

Fig. 2. Layout of grain markets and zones of their influence [5]. Red line indicates boundaries of nodal center zones

Благодаря локализации вдоль р. Волги на рубеже XIX–XX вв. в этих узлах складывается многонациональное население. Если в период второй половины XVIII – середины XIX в. узловые центры были выражены преимущественно одной национальной группой (немцами или малороссами), то с развитием лёгкой промышленности и открытием пристаней эти центры перестали быть мононациональными. Увеличение товарооборота и новые места приложения труда привлекали крестьян из соседних сёл. Формировались этнические слободки. Так, в немецких сёлах Екатериненштадт [6] и Ровное [7] образовались русские слободки с православной церковью, а в малороссийской Покровской слободе сформировалась немецкая слобода с лютеранским молельным домом [8].

Из всех типов объектов капитального строительства в массовой застройке выделяется индивидуальный жилой дом (крестьянская усадьба). Большинство построек следует отнести к концу XIX – началу XX в. В исследуемых территориальных границах и за их пределами имеется ряд если не ти-

повых, то схожих домов, расположенных в этнически разных селениях. Исключение составляли поселения меннонитов, проект дома которых был закреплён как типовой в Атласе департамента сельского хозяйства [9] и распространялся на все меннонитские колонии в Российской империи.

В результате натурных и библиографических исследований были выявлены основные типы домов и организации усадеб, распространённых среди переселенческих групп. Выявление одинаковых типов крестьянских жилищ подтверждает регулирование и упорядочивание сельского строительства на губернском уровне в конце XIX – начале XX в. Независимо от национального состава сёл, имеется единое объёмно-планировочное решение домов и компоновка усадебной застройки вдоль улицы (рис. 3). Исключением оставался усадебный участок, отличавшийся набором хозяйственных строений. Независимо от локализации индивидуального дома в исследуемых границах, весь усадебный комплекс имеет четко выраженную классификацию. Согласно Е.Э. Бломквист, регион характеризуется покоеобразным типом двора с преобладающей постановкой избы перпендикулярно улице и входит в Волжско-Камский (Вятский) подтип. По соотношению жилища и двора: открытая часть двора крестьянской усадьбы больше, и её размеры возрастают в зависимости от постепенного расположения построек в южном направлении региона. Основная группа, к которой относится покоеобразный тип, выражена открытым сверху двором, окружённым надворными строениями, где жилище составляет часть окружения двора [10].

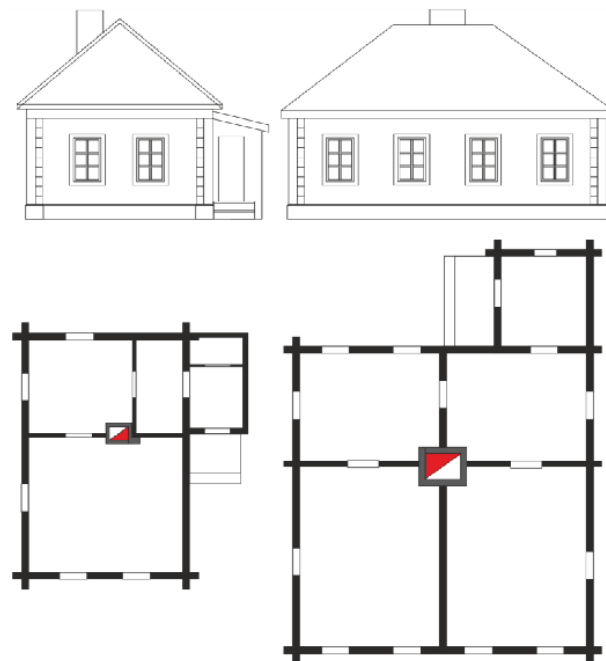


Рис. 3. Типичные дома в немецких и малороссийских сёлах. Выполнено автором по материалам натурного исследования

Fig. 3. Typical houses in German and Little Russian villages. Performed by the author

План застройки усадьбы является составным элементом сложившегося жилого комплекса. Положение дома в составе жилого двора и по отношению к улице, способы соединения жилых и хозяйственных построек, типы хозяйственных построек – все эти компоненты имеют народную специфику, в том числе регламентируемую государством.

На развитие дворовой застройки оказали влияние природные и социальные факторы: планировка селения, размеры приусадебных участков, направление хозяйственной деятельности семей и степень материальной обеспеченности. В составе двора на исследуемой территории встречаются разные типы застройки: замкнутая и свободная, различавшиеся по характеру группировки хозяйственных построек между собой и относительно дома. При натурном обследовании поселений малороссов в левобережной части Волги и систематизации типологий двора были выявлены два основных типа устройства крестьянской усадьбы. Первый тип подразумевает постановку дома перпендикулярно улице, второй – с параллельной постановкой дома. Оба типа идентичны устройству двора в немецких поселениях. В исследуемом районе планировка усадьбы зависела в основном от материального положения крестьянской семьи и ее численного состава. Распространенным типом для немецких и малороссийских поселений стали дома пятистенки и дома с крестовой планировкой (рис. 3). В зажиточных хозяйствах стали появляться дома с ещё более усложнённой планировкой, которые в большинстве своем были особенно характерны для крупных сёл, таких как Узморье, Покровская слобода, Екатериненштадт.

В зависимости от специфики занятий собственника номенклатура надворных построек варьировалась, конкретного набора сооружений, обязательного в каждом хозяйстве, не было. Каждое хозяйство представляло самостоятельную единицу полного цикла, которое должно было обеспечить себя. Поэтому во дворах встречаются конюшни, гумно, птичник, свинарник, амбар, сарай, навес и летняя кухня. Сооружения летней кухни были особенно распространены у немецких колонистов, и наряду с домом главный фасад летней кухни, выходящий на улицу, мог иметь архитектурное оформление. Отличительной особенностью немецкой усадьбы являлось отсутствие бани. По описанию П.К. Галлера, немцы вообще не мылись в банях, предпочитая зимой корыто и речку летом [11]. В остальном устройство двора на рубеже XIX–XX вв. у немецких и малороссийских переселенцев в исследуемых границах левобережья одинаковое.

Большой массив немецкой деревянной застройки в объёме ничем не отличался от тех изб, что строили русские и малороссы в своих сёлах на Волге. Эта черта была отмечена в 19-томном издании «Живописная Россия» [12]. Различия носили декоративно-орнаментальный характер в отделке карнизов, ветровых досок и наличников. Особенности строительных решений зависели от желания заказчика, степени принадлежности к волости и устойчивости отношений с узловым центром. Среди национальных групп были сформированы свои типовые решения декоративного оформления (рис. 4). Нередко можно было встретить проявление национальных черт. Малороссы не теряли преемственность традиционного зодчества, со стороны государства регулирование строительства заключалось в межевании земли и упорядочивании планировки населенных пунк-

тов. Внешнему виду и технике строительства жилой застройки не уделялось особого внимания, лишь велась статистика построенных домов [13].

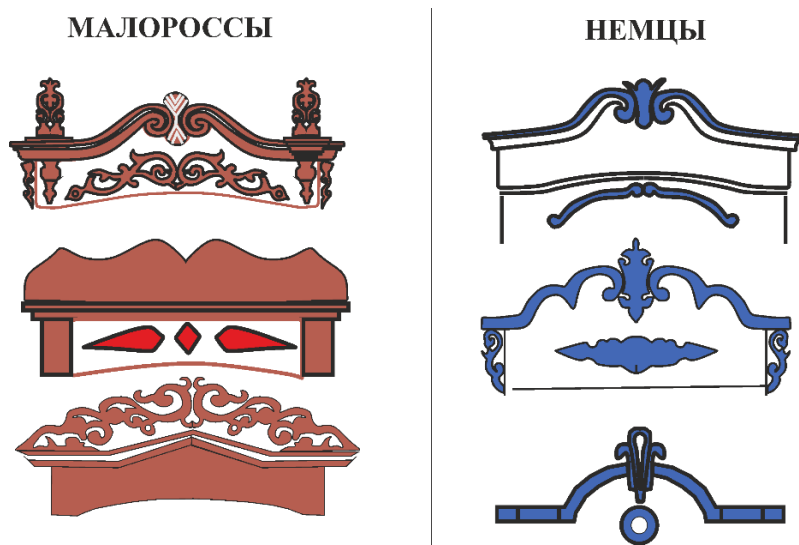


Рис. 4. Типовые решения на примере оконных сандриков. Выполнено автором по материалам натурного исследования

Fig. 4. Typical window cornices. Performed by the author

С развитием экономических отношений архитектура малороссов самостоятельно перенимала новые черты и образовала симбиоз из традиционных и региональных форм. Архитектура немецких переселенцев с 1764 по 1872 г. находилась под контролем Российского государства [14]. Государственная политика не давала возможности европейским переселенцам свободно воспроизводить традиционные типы жилья. Проявление традиционных элементов архитектуры происходило только по согласованию с конторой опекунов и в основном в культовых зданиях. Формирование архитектурного декора в немецких сёлах шло путем заимствования мотивов из городской и соседней малороссийской архитектуры.

Безусловно, каждый крестьянин априори обладал навыками плотника. Имея строительные материалы и план возведения, он мог собрать дом. К концу XIX в. по всей Российской империи были введены единые меры, в том числе для строительных материалов [15], имелись шаблоны архитектурных деталей и готовых фасадов, что значительно упрощало процесс возведения объектов. Однако кроме срубных домов на территории изучения встречаются также каменные, имеющие художественную обточку кирпича. Это обстоятельство ставит под сомнение возможности простого крестьянина и указывает на наличие профессиональных артелей, локализирующихся в одном районе и выполняющих заказы на смежных территориях. Выделяются целые ареалы застройки, архитектурные элементы которых выполнены по единому лекалу. В ходе натурных исследований были выявлены районы с характерным только им стилем деко-

ративного оформления домов, а также моменты дисперсного проникновения сформированных архитектурных элементов между переселенцами. Посредством узловых центров происходил обмен принципами декоративного решения. Благодаря возникновению этнических слободок и торгово-экономическим связям в узловых центрах наблюдается смешение приёмов отделки, взятых из разных сёл. Кроме того, прослеживается эволюция элементов в границах одной национальности от простого к сложному, что говорит о преемственности технологии и желании выделиться на фоне соседнего села (рис. 5).

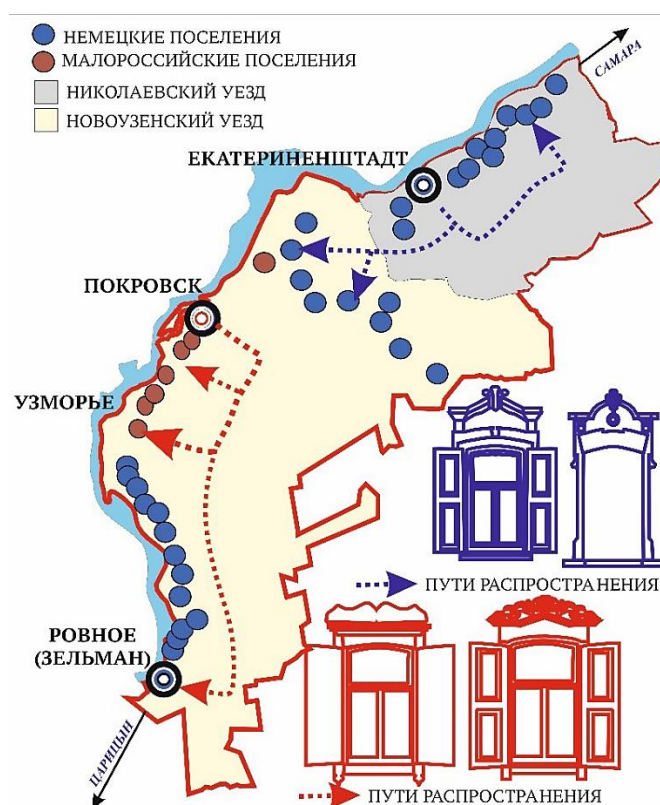


Рис. 5. Принцип обмена на примере оконного оформления. Выполнено автором по материалам натурного исследования

Fig. 5. Schematic of exchange of window design. Performed by the author

Заключение

Центральная часть левобережья Саратовского Поволжья обладает выраженным архитектурным своеобразием. Важным является взаимодействие нескольких национальных групп. Посредством исторически сложившихся узловых центров с окружающими сёлами и сложным симбиозом из традиционных и общепринятых форм сформировалась региональная архитектура. Поскольку сельская жилая застройка имеет массовый характер, то из всех объектов капитального строительства выделяется индивидуальный жилой дом с аутентичным декором.

Изучение усадьбы переселенцев обследованных районов показывает, что жилище – это многоплановый комплекс народной культуры, в нем прослеживаются сложные слои – результат исторического развития и воздействия многих факторов. Благодаря многонациональному населению узловых центров в них прослеживается стирание границ между национальной выраженностью, в отличие от периферийных сёл, которые были сосредоточены на поддержании самоидентичности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Охотников А.Ю. Исследования российско-немецкой сельской архитектуры: историографический обзор // Баландинские чтения. 2018. Т. XIII. № 1. С. 466–469.
2. Dinges. G. Über unsere Mundarten // Geschihichte der Wolgadeutschen. URL: <http://wolga-deutsche.net/library/item-page/49> (дата обращения: 06.10.23).
3. Терёхин С.О. Поселения немцев в России: архитектурный феномен. Саратов : Кадр, 1999. 216 с.
4. Лиценбергер О.А. История немецких поселений Поволжья. Ч. 2. Лютеране: Н-Я / под ред. И.Р. Плеве. Саратов : СГТУ, 2015. 484 с.
5. Новоузенский уезд в естественно-историческом и хозяйственном отношении. По данным обследования 1908 г. С приложением картограмм и диаграмм. Ч. 2. Новоузенск : Издание Новоузенского уездного земства, 1913. 325 с.
6. Лиценбергер О.А. История немецких поселений Поволжья. Ч. 1. Лютеране: А-М / под ред. И.Р. Плеве. Саратов : СГТУ, 2011. 428 с.
7. Лиценбергер О.А. История немецких поселений Поволжья. Ч. 3. Католики / под ред. И.Р. Плеве. Саратов : СГТУ, 2015. 592 с.
8. Список населенных мест Самарской губернии, по сведениям 1889 года / сост. П.В. Кругликов ; Самар. губ. стат. ком. Самара : Тип. И.П. Новикова, 1890. XXVII. 243. 17. V с.
9. Зюрюкин В.Е. Меннониты Кеппентальского района Области немцев Поволжья в бытовом и хозяйственном отношении. Покровск : Издание журнала «УнзереВиртшафт» Области Немцев Поволжья, 1923. 212 с.
10. Восточнославянский этнографический сборник // Очерки народной материальной культуры русских, украинцев и белорусов в XIX – начале XX в. Москва : РИСО АН СССР, Академия наук СССР, 1956. 805 с.
11. Галлер П.К. Воспоминания П.К. Галлера: (Быт немцев-колонистов в 60-х годах XIX ст.). Саратов : Н.-Волжское обл. науч. об-во краеведения, 1927. 71 с.
12. Живописная Россия: Отечество наше в его земельном, историческом, племенном, экономическом и бытовом значении. Т. 8. Среднее Поволжье и Приуральский край. Ч. 2. Приуральский край / под общ. ред. П.П. Семенова. Санкт-Петербург : Тип. М.О. Вольф, 1901. 305 с. URL: <https://www.prlib.ru/item/690134> (дата обращения: 04.06.2020).
13. Ерина Е.М. Под покровом Богородицы из истории слободы Покровской – Покровска – Энгельса в документах и фактах. Саратов : Приволжское книжное изд-во, 2003. 320 с.
14. Высочайше утверждённый доклад Сената. (*) О прибавке к имеющимся ныне при Канцелярии Опекунства иностранных Членам и канцелярским служащим ещё некоторых по приложенному росписанию, и об учреждении в Саратове для колонистов особой Конторы: № 12.630 от 28 апреля 1765 г. // Полное собрание законов Российской империи. Собрание первое. 1765–1766 гг. В 45 томах. Т. 17 / под ред. М.М. Сперанского. Санкт-Петербург : Тип. II Отделения Собственной Его Императорского Величества Канцелярии, 1830. 1135 с.
15. Именный, данный Сенату, опубликованный 7 Ноября. – О системе Российских мер и весов: № 8459 от 11 октября 1835 г. // Полное собрание законов Российской империи. Собрание второе. 1830–1885 гг. Т. X. Отделение 2. Санкт-Петербург : Тип. II Отделения Собственной Его Императорского Величества Канцелярии, 1835. 910 с.

REFERENCES

1. *Ohotnikov A.Yu.* Studies of Russian-German rural architecture: A historical overview. In: *Coll. Papers in memory of S.N. Balandin 'Balandin Readings'*. 2018; 13 (1): 466–469 p. (In Russian)
2. *Dinges. G.* Uber unsere Mundarten. Available: <http://wolgadeutsche.net/library/item-page/49> (accessed October 14, 2022).
3. *Teryohin, S.O.* German settlements in Russia. An architectural phenomenon. Saratov: Kadr, 1999. 216 p. (In Russian)
4. *Licenberger O.A.* History of German settlements in the Volga region. Part 2. Lutherans. I.R. Pleve, Ed., Saratov, 2015. 484 p. (In Russian).
5. Novouzensky uyezd in natural-historical and economic terms. According to the survey of 1908 with the application of cartograms and diagrams. Part 2. Novouzensk, 1913. 325 p. (In Russian)
6. *Licenberger O.A.* History of German settlements in the Volga region. Part 1. Lutherans. I.R. Pleve, Ed., Saratov, 2011. 428 p. (In Russian)
7. *Licenberger O.A.* History of German settlements in the Volga region. Part 3. Catholics Saratov. I.R. Pleve, Ed., Saratov 2015. 592 p. (In Russian)
8. *Kruglikov P.V.* List of populated places of Samara province, according to information from 1889. Samara: Samara provincial statistical committee. Printing house I.P. Novikova, 1890. 27, 243 p. (In Russian)
9. Mennonites of the Keppenthal district of the Volga Germans region in everyday and economic terms. Pokrovsk, 1923. (In Russian)
10. East Slavic Ethnographic collection. Essays on the Folk Material Culture of Russians, Ukrainians and Belarusians in the 19th and early 20th centuries, Academy of Sciences USSR. Moscow, 1956. (In Russian)
11. *Galler P.K.* Memories: The life of the German colonists in the 1960s. Saratov, 1927. (In Russian)
12. *Volf O.* Picturesque Russia: Our Fatherland in its land, historical, tribal, economic and everyday significance. Available: www.prilib.ru/item/690134 (accessed June 4, 2020). (In Russian)
13. *Erina E.M.* Under the protection of the Virgin from the history of the Pokrovskaya – Pokrovsk-Engels settlement in documents and facts. Saratov, 2003. 320 p. (In Russian)
14. The most highly approved report of the Senate. On the addition to the foreign members and clerical employees currently available at the Office of Guardianship of some more according to the attached signature, and on the establishment of a special Office in Saratov for colonists. No. 12.630 of April 28, The complete collection of laws of the Russian Empire. The first meeting. Vol. 17, Saint-Petersburg, 1765. 1135 p. (In Russian)
15. Nominal, given to the Senate, published on November 7. The system of Russian weights and measures: No. 8459 of October 11, 1835. The complete collection of laws of the Russian Empire. The second meeting. Vol. 10. Saint-Petersburg, 1835. 910 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Рыбалкин Егор Витальевич, аспирант, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, egor.rybalkin96@mail.ru

Author Details

Egor V. Rybalkin, Research Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politehnicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia, egor.rybalkin96@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2023
Одобрена после рецензирования 19.11.2023
Принята к публикации 20.11.2023

Submitted for publication 13.11.2023
Approved after review 19.11.2023
Accepted for publication 20.11.2023

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 78–88.

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 (6): 78–88.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.012.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-78-88

EDN: YNXOYO

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НАЗЕМНОЙ ЧАСТИ

Анай-Хаак Бугалдаевна Калдар-оол, Орлан Ангыр-оолович Донгак
Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В настоящее время особое внимание уделяется вопросам контроля качества несущих конструкций наземной части с использованием поверочных расчетов, где предусматривается проверка фактической прочности, жесткости и трещиностойкости элементов.

Цель исследования – развитие аналитического и численного методов расчета изгибаемых железобетонных элементов на примере ребристой плиты перекрытия для оценки их фактического технического состояния.

Научная новизна исследования – проведен численно-аналитический расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов на основе нормативных документов.

Методы исследования. В работе применены известные нормативные методы расчета железобетонных конструкций по определению несущей способности конструкций, приведено сопоставление результатов аналитических и численных методов.

Результаты. Расчет прочности плиты перекрытия на основе действующих норм дополнен численным методом с использованием программного комплекса ЛИРА. Для статического расчета применены общеизвестные формулы для изгибаемых элементов. Анализ предельного состояния плиты перекрытия с использованием аналитических и численных методов позволяет с достаточной точностью оценить техническое состояние конструкции. Результаты расчетов конструкции показывают некоторые расхождения, что в перспективе требует корректировки.

Ключевые слова: численный расчет, аналитический расчет, железобетон, перекрытие, прочность

Для цитирования: Калдар-оол А.-Х.Б., Донгак О.А. Поверочный расчет для контроля качества несущих конструкций наземной части // Вестник Томского

государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 78–88. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-78-88. EDN: YNXOYO

ORIGINAL ARTICLE

VERIFICATION ANALYSIS FOR QUALITY CONTROL OF LOAD-BEARING SUPERSTRUCTURES

Anai-Khaak B. Kaldar-ool, Orlan A. Dongak

Tuvan State University, Kyzyl, Russia

Abstract. It is currently relevant to perform the quality control of load-bearing superstructures using verification calculations, which provide strength, rigidity and crack resistance of elements.

Purpose: The development of analytical and numerical methods to evaluate bendable reinforced concrete elements of a ribbed floor slab.

Methodology/approach: Well-known normative methods for the strength analysis of reinforced concrete structures; comparison of analytical and numerical results obtained in the LIRA software package.

Research findings: Well-known formulas for bending elements are used for static calculations. The analysis of the limit state of the floor slab using analytical and numerical methods allows assessing the structural state with sufficient accuracy. The structural analysis shows some discrepancies, which require correction in the future.

Originality/value: numerical strength analysis of bent reinforced concrete elements.

Keywords: numerical calculation, analytical calculation, reinforced concrete, overlap, strength

For citation: Kaldar-ool A.-Kh.B., Dongak O.A. Verification analysis for quality control of load-bearing superstructures. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 78–88. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-78-88. EDN: YNXOYO

В последнее время федеральные и региональные органы экспертиз в связи с участвовавшими случаями внезапного обрушения требуют особого внимания к качеству выдаваемых по результатам расчётов заключений и обоснований в проектно-конструкторских решениях по строительным конструкциям. Повышенное внимание к качеству прочностных и эксплуатационных характеристик зданий и сооружений вызвано также усложнением проектных решений и разнообразием архитектурных форм, повышенной этажностью зданий, сложной технологией возведения и принятием необоснованно заниженного запаса прочности конструкций [1, 2], что определяет актуальность исследования.

Происшедшие аварии на стадии строительства и эксплуатации объектов дополнительно повысили внимание к проблеме прочности и надёжности конструкций [1].

Общеизвестно [2, 3], что контрольная проверка качества строительных материалов и конструкций должна включать проведение следующих процедур:

– обязательная проверка строительных материалов на соответствие их физико-механических свойств государственным стандартам и представленным техническим условиям;

– ряд комплексных работ, направленных на поддержание в исправном состоянии внутренних систем здания и всех его элементов, а также корректирование работы всех конструкций и устройств.

Между тем мониторинг конструкций зданий и сооружений по прочности, жесткости и трещиностойкости должен включать:

– выполнение поверочного расчета несущих конструкций по двум предельным состояниям;

– определение надежности конструкторских проектов зданий и сооружений;

– анализ страховых рисков в этапах проектирования, строительства и эксплуатации конструкций зданий и сооружений.

Проведение поверочных расчетов достаточно важно, т. к. полученные результаты показывают фактическую величину несущей способности и пригодность к нормальной эксплуатации конструкций.

Поверочные расчеты выполняют с учетом результатов обследования: выявленных дефектов, отклонений от размеров, реальных прочностных свойств материала, действительных расчетных схем и нагрузок и др.

Железобетонные конструкции в виде балок и плит с различным характером опирания могут получать повреждения в период возведения сооружений. Повреждения локального характера уменьшают несущую способность конструкций, однако не приводят к полной ее потере.

Под локальными повреждениями железобетонных конструкций следует понимать изменение геометрических характеристик конструкций и физических характеристик материалов конструкций в ограниченной (локальной) области элемента.

Схема расположения локальных повреждений в большинстве случаев носит нерегулярный характер, что затрудняет возможность использовать наиболее распространенный и простой балочный подход для оценки несущей способности поврежденных конструкций в виде плит.

Статистический расчет железобетонных плитных конструкций, имеющих локальные повреждения нерегулярного характера, вызывает значительные трудности [4].

Изгибаемым элементам посвящен ряд экспериментально-теоретических исследований [5, 6, 7, 8, 9]. Основные подходы к вопросам о наиболее безопасном и оптимальном проектировании конструкций, а также аналитические и численные методы расчета изложены в работах [5, 6, 7]. Актуальны работы, рассматривающие комбинированные изгибаемые элементы [8] из разнообразных материалов [9].

Можно отметить работы [10, 11, 12, 13, 14], где удачно использован нелинейный метод расчета прочности и напряженного состояния на основе итерационных процедур применительно к изгибаемым элементам из фиброжелезобетона.

Моделирование поведения изгибаемых железобетонных балок с учетом фактического напряженно-деформированного состояния изложено в работе [15].

Цель исследования – развитие аналитического и численного методов расчета изгибаемых железобетонных элементов на примере ребристой плиты перекрытия для оценки их фактического технического состояния.

Задачи исследования:

1. На основе известных нормативных методов определить внутренние усилия ребристой плиты перекрытия.

2. Выполнить численный расчет плиты перекрытия в программном комплексе ЛИРА.

3. Представить относительные сравнения результатов методов расчётов.

В работе применены теоретические методы исследования, определяющие несущую способность конструкции, выполнен приближенный расчет по определению усилий ребристой плиты перекрытия для оценки контроля качества конструкции. Для приближенного описания решения одной и той же конструкции может быть применен аналитический расчет и численный эксперимент без учета дефектов. Исследуемая конструкция сначала описывается линейным статистическим расчетом, для сравнения проведен численный расчет модели плиты перекрытия при разбивке ее сравнительно небольшим количеством конечных элементов. Поперечное сечение плиты приведено на рис. 1, характеристики нагрузок – в табл. 1.

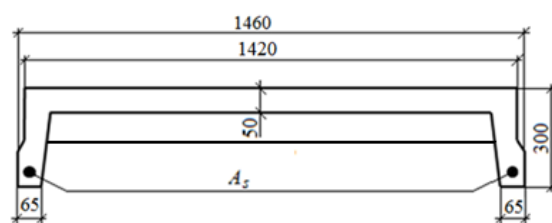


Рис. 1. Поперечное сечение плиты [18]

Fig. 1. Cross-section of the slab

Таблица 1

Сбор нагрузок на 1 м² плиты [16, 18]

Table 1

Loads onto 1 m² slab

Название нагрузки	Нормативная нагрузка, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетная нагрузка, кН/м ²
Постоянная:			
собственный вес плиты при толщине 8 см, $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$	2	1,1	2,2
перекрытия от пола (плиточного), $t = 0,015 \text{ м}$, $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$	0,3	1,1	0,33
от слоя цементного раствора, $t = 0,02 \text{ м}$, $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$	0,4	1,3	0,520
шлакобетонного слоя, $t = 0,03 \text{ м}$, $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$	0,45	1,3	0,585
Итого	$g^n = 3,15$	—	$g = 3,635$
Временная	5	1,2	6
Полная	8,15	—	$q = 9,64$

В качестве первой попытки оценить конструкцию проведено сравнение решения расчета ребристой плиты перекрытия с результатом современного расчета в программном комплексе ЛИРА.

Бетон класса В20, класс рабочей продольной арматуры А400, класс поперечной и конструктивной арматур В500 [16, 17, 18].

Нормативная временная нагрузка, действующая на плиту перекрытия, $p_n = 5 \text{ кН/м}^2$, $\gamma_f = 1,2$ – коэффициент надежности по нагрузке.

$\gamma_{b2} = 0,9$ – коэффициент условия работы бетона, поскольку нагрузка малой суммарной продолжительности отсутствует.

Для материала бетона класса В20:

Расчетные сопротивления бетона $R_b = 11,5 \text{ МПа}$, $R_{bt} = 0,9 \text{ МПа}$, $E_b = 27,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

$\gamma_{b1} = 0,9$ – нормативный коэффициент условий.

Расчетные сопротивления с учетом $\gamma_{b1} = 0,9$:

$R_b = \gamma_{b1} R_b = 11,5 \cdot 0,9 = 10,35 \text{ МПа}$;

$R_{bt} = \gamma_{b1} R_{bt} = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81 \text{ МПа}$.

Удельная плотность материала:

$\gamma_b = 2400 \text{ кг/см}^3 = 24 \text{ кНм}^3$.

Арматура класса А400: $R_s = 390 \text{ МПа}$; $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Поперечная (хомуты) и конструктивная арматурная сталь класса В500: $R_{sw} = 300 \text{ МПа}$, $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Для определения расчетного пролета зададим размеры поперечного сечения ригеля:

$l_b = 6,0 \text{ м}$, $h_b = l_b/10 = 600/10 = 60 \text{ см}$, $b_b = 0,3 \cdot h_b = 20 \text{ см}$.

$l_1 = l_b - b_b/2 = 6 - 0,2/2 = 5,9 \text{ м}$.

$h'_f = 8 \text{ см}$ – высота полки, $b = 146 \text{ см}$ – ширина полки.

$b'_f = 146 - 40 = 1420 \text{ мм}$; $b' = 1420 - 2 \cdot 65 = 1290 \text{ мм}$.

Рабочая высота $h_0 = h - a = 300 - 30 = 270 \text{ мм}$.

a – защитный слой бетона.

$\frac{h'_f}{h} = \frac{8}{30} = 0,267 > 0,1$.

Рассматривается полоса шириной $b = 1 \text{ м}$.

Погонная нагрузка принимается на ширину плиты:

$q = 9,64 \text{ кН/м}$.

Усилия от действия внешней нагрузки:

$M = ql_1^2 / 8 = 9,64 \cdot 5,9^2 / 8 = 41,92 \text{ кН} \cdot \text{м}$;

$Q = ql_1 / 2 = 9,64 \cdot 5,9 / 2 = 28,44 \text{ кН}$ – поперечная сила.

Расчет плиты перекрытия по нормальному сечению. Зависимость вычисляется:

$$\alpha_m = \frac{M}{R_b b'_f h_0^2} = \frac{41,92 \cdot 10^6}{10,35 \cdot 1420 \cdot 270^2} = 0,039 < \alpha_R = 0,411.$$

Изменение площади сечения арматуры определяется по известной формуле

$$A_s = R_b b'_f h_0 (1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m}) / R_s = \\ = 10,35 \cdot 1420 \cdot 270 (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,039}) / 270 = 587,88 \text{ мм}^2.$$

В результате вычислений получено требуемое количество рабочей арматуры $A_s = 587,88 \text{ мм}^2$:

$$4\emptyset 12 + 2\emptyset 10; \sum A_s = 452 + 157 = 609 \text{ мм}^2.$$

Проверяем условие: $R_s \cdot A_s \leq R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b'_f \cdot h'_f$.

$$390 \cdot 10^3 \cdot 609 \cdot 10^{-6} = 237,51 \text{ кН} < 11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 1,420 \cdot 0,08 = 1175,76 \text{ кН}.$$

Определяем высоту сжатой зоны:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b'_f} = \frac{390 \cdot 619}{11,5 \cdot 0,9 \cdot 1420} = 16 \text{ мм.} \\ \xi = \frac{x}{h_0} = \frac{16}{270} = 0,06 < \xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{R_s}{700}} = \frac{0,8}{1 + \frac{390}{700}} = 0,514.$$

Изгибающий момент от внутренних усилий можно выразить следующей формулой:

$$M'_f = \overline{R_b b'_f} x (h_0 - x / 2) = \\ = 10,35 \cdot 10^3 \cdot 1,42 \cdot 0,016 \cdot (0,27 - 0,016 / 2) = 61,61 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Тогда $M'_f \geq M$ – условие прочности выполняется.

Расчет элемента по несущей способности на действие Q . Расчетные параметры:

$Q = 28,44 \text{ кН}$ – величина от внешней нагрузки;

$q = 9,64 \text{ кН/м}$ – действующая нагрузка на исследуемый объект.

Выбраны хомуты класса В500, $R_{sw} = 300 \text{ МПа}$.

Зависимость прочности наклонного сечения:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw},$$

где Q – поперечная сила от внешней нагрузки; $Q_b = \frac{M_b}{c}$ – перерезывающая сила сжатой зоны бетона в наклонном сечении; Q_{sw} – усилие в хомутах наклонного сечения; $M_b = 1,5 R_{bt} b h_0^2 = 1,5 \cdot 0,81 \cdot 146 \cdot 270^2 = 12,93 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ – момент в сжатом бетоне наклонного сечения;

$$c = \sqrt{\frac{M_b}{q}} = \sqrt{\frac{12,93 \cdot 10^6}{9,64}} = 1158 \text{ мм}.$$

Нормативное ограничение $c \leq 2h_0$.

Принимаем $c = 2h_0 = 2 \cdot 270 = 540 \text{ мм}$, тогда поперечное усилие в сжатом бетоне

$$Q_b = \frac{M_b}{c} = \frac{12,93 \cdot 10^6}{540} = 23944 \text{ Н} = 23,9 \text{ кН}.$$

Назначение шага хомутов у опоры:

$$S_w = 100 \text{ мм (не более } h/2 = 270/2 = 135 \text{ мм)}.$$

Вычисление в первом приближении:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{S_w} = \frac{300 \cdot 50,24}{100} = 150 \text{ Н/мм}.$$

Проверяем условие:

$$\frac{q_{sw}}{R_{bt} \cdot b} = \frac{150}{0,81 \cdot 146} = 1,26 < 2 \text{ – условие выполняется.}$$

$$Q_{sw} = 0,75 q_{sw} c = 0,75 \cdot 150 \cdot 540 = 60750 \text{ Н} = 60,7 \text{ кН}.$$

Проверка условия прочности конструкции:

$Q_b + Q_{sw} = 23,9 + 60,7 = 84,6 \text{ кН} > Q = 28,44 \text{ кН}$ – несущая способность наклонных сечений обеспечена. Некоторый запас можно уменьшить пересчетом.

В программном комплексе ЛИРА создана расчетная модель. Для получения достоверного результата использованы абсолютно жесткие тела, связывающие ребро и саму плиту воедино [2]. Конечно-элементная и пространственная модели плиты представлены на рис. 2, 3 [2, 19].

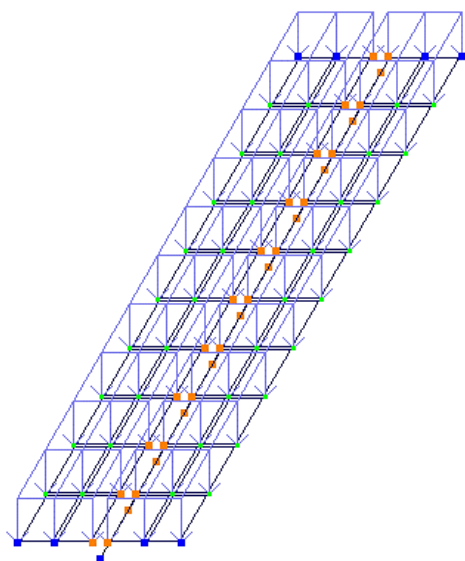


Рис. 2. Конечно-элементная модель плиты

Fig. 2. FEM of slab

Крайние узлы пластин со стороны стержня и узлы стержня образуют абсолютно жесткие тела [2].

По результатам численного расчета получены усилия от внешних нагрузок: $M = 108 \text{ кН·м}$; $Q = 116 \text{ кН}$.

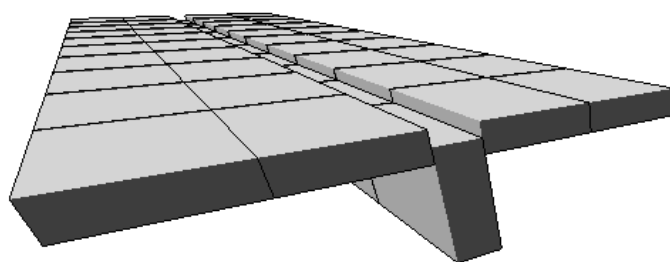


Рис. 3. Пространственная модель плиты
Fig. 3. Three-dimensional model of slab

Сравнение результатов численного (МКЭ) и аналитического методов представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение результатов

Table 2

Comparison of parameters

Методы	M , кН·м	Q , кН
По нормам	61,61	84,6
Численный на Лире	108	116
%	42,9	27

Выводы

1. Количественные расхождения (42,9 и 27 %) между аналитическим и численным методом, очевидно, обусловлены многими факторами, которые требуют корректировки.

2. Для улучшения сходимости результатов в дальнейшем необходимы изучение и анализ применяемых в поверочных расчетах нормативных коэффициентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Городецкий А.С., Назаров Ю.П., Жук Ю.Н., Симбиркин В.Н. Повышение качества расчетов строительных конструкций на основе совместного использования программных комплексов STARK ES И ЛИРА // Информационный вестник Мособлгосэкспертизы. 2005. № 1 (8). С. 42–49.
2. Куликова О.Ю., Васильев А.С. Моделирование ребристых плит перекрытий в системе ЛИРА САПР // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2018. № 1 (30). С. 49–54. EDN YODZEL
3. Керженцев О.Б. Экспериментальные исследования прочностных и деформационных характеристик арматуры с односторонними повреждениями // Совершенствование методов расчета и исследование новых типов железобетонных конструкций : межвуз. темат. сб. тр. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 1999. С. 46–50.
4. Ставров Г.Н., Катаев В.А., Гунин С.О., Симченков С.С. Динамический расчет конструкций в виде плит с локальными повреждениями // Совершенствование методов рас-

- чета и исследование новых типов железобетонных конструкций : межвуз. темат. сб. тр. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 1999. С. 75–82.
5. Michal D., Jacek Š. Design aspects of the safe structuring of reinforcement in reinforced concrete bending beams // *Procedia Engineering*. 2017. V. 172. P. 211–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
 6. Herranz J.P., Maria H.S., Gutiérrez S., Riddell R. Optimal Strut-and-tie models using full homogenization optimization method // *ACI Structural Journal*. 2012. V. 109 (5). P. 605–613. DOI: 10.14359/51684038
 7. Garstecki A., Glema A., Ścigallo J. Optimal design of reinforced concrete beams and frames // *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*. 1996. V. 3 (3). P. 223–231.
 8. Amin A., Gilbert R.I. instantaneous crack width calculation for steel fiber-reinforced concrete flexural members // *Aci Structural Journal*. 2018. V. 115. № 2. P. 535–542. DOI:10.14359/51701116
 9. Szeptyński P. Comparison and experimental verification of simplified one-dimensional linear elastic models of multilayer sandwich beams // *Composite Structures*. 2020. V. 214. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112088
 10. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Vedernikova A.A. Calculation of bending of steel-fiber-reinforced concrete members by a nonlinear deformation model with the use of iteration procedures // *Mechanics of Composite Materials*. 2018. V. 54. № 5. P. 379–394. DOI:10.1007/s11029-018-9769-x
 11. Онбул Э.К., Ондар Э.Э., Калдар-оол А.-Х.Б. Расчет прочности фиброжелезобетонных изгибаемых элементов с использованием трехлинейной диаграммы деформирования растянутой зоны // *Научное обозрение*. 2016. № 14. С. 100–106.
 12. Онбул Э.К., Ондар Э.Э., Калдар-оол А.-Х.Б. Деформационные модели расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов // *Вестник Тувинского государственного университета*. Вып. 3. Технические и физико-математические науки. 2020. № 1 (58). С. 6–22.
 13. Онбул Э.К., Калдар-оол А.-Х.Б. Практическое применение нелинейной деформационной модели в расчёте коротких железобетонных элементов, находящихся в косом внецентренном сжатии // *Вестник Тувинского государственного университета*. Вып. 3. Технические и физико-математические науки. 2022. № 1 (90). С. 34–48.
 14. Онбул Э.К., Калдар-оол А.-Х.Б., Ле Куанг Хюи. Деформационная модель прочности изгибаемого элемента в среде Matlab // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 4. С. 110–129. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-110-129
 15. Wróblewski R., Ignatowicz R., Gierczak J. Influence of Shrinkage and Temperature on a Composite Pretensioned – Reinforced Concrete Structure. *Procedia Engineering*. 2017. V. 193. P. 96–103. DOI:10.1016/j.proeng.2017.06.191
 16. Золотарев В.П. Железобетонные конструкции. Расчет и конструирование. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2007. 62 с.
 17. Онбул Э.К., Калдар-оол А.-Х.Б. Железобетонные конструкции. Расчет и конструирование. Кызыл : ТувГУ, 2022. 128 с.
 18. Иванов-Дятлов И.Г., Деллос К.П., Иванов-Дятлов А.И. Строительные конструкции / под ред. В.Н. Байкова, Г.И. Попова. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Высшая школа, 1986. 543 с.
 19. Ромашикина М.А., Титок В.П. Программный комплекс ЛИРА-Сапр®. Руководство пользователя. Обучающие примеры. 2018. 254 с. URL: https://rflira.ru/files/lira-sapr/Book_LIRA_SAPR_2018.pdf (дата обращения: 13.10.2023).

REFERENCES

1. Gorodetsky A.S., Nazarov Yu.P., Zhuk Yu.N., Simbirkin V.N. Quality improvement of structural analysis in STARK ES and LIRA. *Informatsionnyi vestnik Mosoblgoosekspertizy*. 2005; 1 (8): 42–49. (In Russian)
2. Kulikova O.Yu., Vasiliev A.S. Modeling of ribbed floor slabs in LIRA CAD system. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018; 1 (30): 49–54. EDN YODZEL (In Russian)
3. Kerzhentsev O.B. Strength and deformation characteristics of reinforcement with one-sided damages. In: *Improvement of Calculation Methods and Investigation of New Types of Reinforced Concrete Structures*. Saint-Petersburg, 1999. Pp. 46–50. (In Russian)

4. Stavrov G.N., Kataev V.A., Gunin S.O., Simchenkov S.S. Dynamic calculation of plate structures with local damages. In: Improvement of Calculation Methods and Investigation of New Types of Reinforced Concrete Structures. Saint-Petersburg, 1999. Pp. 75–82. (In Russian)
5. Michal D., Jacek Š. Design aspects of the safe structuring of reinforcement in reinforced concrete bending beams. *Procedia Engineering*. 2017; 172: 211–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
6. Herranz J.P., Maria H.S., Gutiérrez S., Riddell R. Optimal strut-and-tie models using full homogenization optimization method. *ACI Structural Journal*. 2012; 109 (5): 605–613. DOI: 10.14359/51684038
7. Garstecki A., Glema A., Ścigallo J. Optimal design of reinforced concrete beams and frames. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*. 1996; 3 (3): 223–231.
8. Amin A., Gilbert R.I. Instantaneous crack width calculation for steel fiber-reinforced concrete flexural members. *ACI Structural Journal*. 2018; 115 (2): 535–542. DOI:10.14359/51701116
9. Szeptyński P. Comparison and experimental verification of simplified one-dimensional linear elastic models of multilayer sandwich beams. *Composite Structures*. 2020; 214: 1–13. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112088
10. Opbul E.K., Dmitriev D.A., Vedernikova A.A. Calculation of bending of steel-fiber-reinforced concrete members by a nonlinear deformation model with the use of iteration procedures. *Mechanics of Composite Materials*. 2018; 54 (5): 379–394. DOI:10.1007/s11029-018-9769-x
11. Opbul E.K., Ondar E.E., Kaldar-ool A-H.B. Strength calculation of fiber-reinforced concrete bending elements using three-linear diagram of tensile deformation. *Nauchnoe obozrenie*. 2016 (14): 100–106. (In Russian)
12. Opbul E.K., Ondar E.E., Kaldar-ool A-H.B. Deformation models for strength analysis of bending steel concrete elements. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta*, Vol. 3. 2020; 58 (1): 6–22. (In Russian)
13. Opbul E.K., Kaldar-ool A-H.B. Practical application of nonlinear deformation model in strength analysis of short reinforced concrete elements in oblique off-center. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta*, Vol. 3. 2022; 1 (90): 34–48. (In Russian)
14. Opbul E.K., Kaldar-ool A-Kh.B., Le Kuang Khyui. Deformation modeling of bending element strength in MATLAB. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (4): 110–129. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-110-129 (In Russian)
15. Wróblewski R., Ignatowicz R., Gierczak J. Influence of shrinkage and temperature on a composite pretensioned – Reinforced concrete structure. *Procedia Engineering*. 2017; 193: 96–103. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.191
16. Zolotarev V.P. Reinforced concrete structures: Calculation and construction. Saint-Petersburg, 2007. 62 p. (In Russian)
17. Opbul E.K., Kaldar-ool A-H.B. Reinforced concrete structures: Calculation and construction. Kyzyl, 2022. 128 p. (In Russian)
18. Ivanov-Dyatlov I.G., Dellos K.P., Ivanov-Dyatlov A.I. Building constructions. V.N. Baikov, G.I. Popov, Eds., 2nd ed., Moscow: Vysshaya Shkola, 1986. 543 p. (In Russian)
19. Romashkina M.A., Titok V.P. LIRA-Sapr® User Manual. Teaching examples. 2018. 254 p. Available: https://rflira.ru/files/lira-sapr/Book_LIRA_SAPR_2018.pdf (accessed October 13, 2023). (In Russian)

Сведения об авторах

Калдар-оол Анай-Хаак Бугалдаевна, канд. техн. наук, Тувинский государственный университет, 667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, oorzhaka-h@mail.ru

Донгак Орлан Ангыр-оолович, магистрант, Тувинский государственный университет, 667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, dongak45orlan97@mail.ru

Authors Details

Anai-Khaak B. Kaldar-ool, PhD, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, the Republic of Tuva, Russia, oorzhaka-h@mail.ru

Orlan A. Dongak, Undegraduate Student, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, the Republic of Tuva, Russia, dongak45orlan97@mail.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 10.03.2023
Одобрена после рецензирования 20.10.2023
Принята к публикации 21.11.2023

Submitted for publication 10.03.2023
Approved after review 20.10.2023
Accepted for publication 21.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 89–101.

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 (6): 89–101.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.32

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-89-101

EDN: YJYZWM

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА ПРИ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Павел Алексеевич Хазов¹, Ирина Васильевна Шкода²,
Лидия Юрьевна Тягунова¹

¹Нижегородский государственный

архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

²Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской академии наук,

г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Актуальность. Изучение динамических свойств материалов является ключевым аспектом для проведения сложных инженерных расчетов. Наиболее часто используемые на данный момент методы определения динамических характеристик являются дорогостоящими и трудновоспроизводимыми в условиях отсутствия специального оборудования. Следовательно, существует необходимость разработки упрощенных методик, позволяющих инженеру определять конкретные характеристики материала, избегая проведения сложных лабораторных испытаний, что подтверждает актуальность данной темы исследования.

Цель исследования – разработка и обоснование упрощенной методики определения динамических свойств различных материалов на примере древесины сосны.

В исследовании применяются *методы экспериментального моделирования* при помощи современных измерительных устройств и последующая *аналитическая обработка* полученных результатов.

Научная новизна заключается в предложении упрощенной методики определения динамических параметров материала с помощью анализа зарегистрированных блоком акселерометра колебаний шарнирно закрепленной двухопорной балки.

В результате исследования определен динамический модуль упругости древесины сосны, с высокой точностью совпадающий со справочными значениями, а также получен коэффициент затухания колебаний, необходимый при расчете динамических систем в околорезонансных зонах.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предлагаемой методики для определения динамических свойств новых материалов с целью дальнейшего внесения этих характеристик в базы данных программно-вычислительных комплексов.

Ключевые слова: собственные колебания, декремент затухания, динамический модуль упругости, коэффициент затухания, акселерометр

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Нижегородской области (грант Нижегородской

области в сфере науки, технологий и техники от 04.07.2023 года № 316-06-16-118a/23).

Для цитирования: Хазов П.А., Шкода И.В., Тягунова Л.Ю. Методика определения динамических параметров материала при свободных колебаниях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 89–101. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-89-101. EDN: YJYZWM

ORIGINAL ARTICLE

DETERMINATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF FREE VIBRATING MATERIALS

Pavel A. Khazov¹, Irina V. Shkoda², Lidiia Yu. Tiagunova¹

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

²*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The most commonly used methods for determination of dynamic properties are expensive and difficult to reproduce without specialised equipment. There is a need to develop simplified techniques that allow to determine specific material properties, avoiding the use of complex laboratory tests.

Purpose: The aim of this work is to develop and test a simplified methodology for determining dynamic properties of various materials using pine wood as an example.

Methodology: Experimental modelling using up-to-date measuring devices and analytical processing of the obtained results.

Research findings: The dynamic modulus of elasticity of pine wood is determined with high accuracy and coincides with reference values. The coefficient of vibration damping is obtained for the calculation of dynamic systems in near-resonance zones.

Practical implications: The proposed methodology can be used to determine the dynamic properties of new materials in order to enter these characteristics in software databases and computer complexes.

Originality: The proposed method of determining the dynamic parameters of the material is based on the analysis of two-support beam vibrations registered by an accelerometer.

Keywords: natural vibrations, damping decrement, dynamic modulus of elasticity, damping factor, accelerometer

Funding: This work was financially supported by Grant N 316-06-16-118a/23 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Khazov P.A., Shkoda I.V., Tiagunova L.Yu. Determination of dynamic parameters of free vibrating materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 89–101. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-89-101. EDN: YJYZWM

Введение

Для сложных расчетов напряженно-деформированного состояния и прочности различных конструкций, испытывающих интенсивные динамические воздействия, наиболее часто применяют различные программно-вычислительные комплексы (ПВК) (ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA и др). Достоверность и точность вычислений таких ПВК определяется критериями разрушения мате-

риалов и конструкций, а также материальными функциями, которые описывают реальную картину работы исследуемых объектов с учетом различных факторов (влияния скоростей деформаций, деформационного упрочнения и т. д.). В настоящее время, с появлением новых материалов и сплавов, чьи свойства не до конца изучены, требуется расширение базы данных ПВК для получения корректных результатов. Оснащение базы данных ПВК информацией о свойствах материалов и работе конструкций происходит посредством реальных натурных экспериментов с последующим внесением их результатов в базу [1]. Все это указывает на необходимость разработки новых экспериментальных методов для оснащения таких моделей необходимыми параметрами, а также на актуальность исследования, представленного в настоящей статье.

Как отмечает в своей диссертации А.Ю. Константинов [2], систематическое изучение динамических свойств материалов было начато в конце XIX – начале XX в. трудами отца и сына Дж. и Б. Гопкинсонов. В России изучение свойств материалов при высоких скоростях деформации началось в 30-х гг. прошлого века Н.Н. Давиденковым и было продолжено Ф.Ф. Витманом, Н.А. Златиным, В.А. Степановым, Ю.Я. Волошенко-Климовицким, А.А. Ильюшиным, В.С. Ленским, Р.А. Васиным и др. За рубежом исследованию этого вопроса посвящены работы Р. Дэвиса, А. Надаи, Дж. Даффи, Дж. Тейлора, Г. Кольского, Дж. Кэмпбелла, У. Линдхольма, Дж. Белла, А. Кобаяси. К настоящему времени результаты систематических исследований процессов высокоскоростной деформации различных материалов представлены в работах С.А. Новикова, Г.В. Степанова, А.П. Большакова, К. Альбертини, Дж. Филда, Дж. Грея, У. Прауда, Я. Клепачко, Дж. Хардинга, Ф. Хаузера, Г. Гари, З. Розенберга, С. Немат-Нассера и др. [2, 3, 4, 5].

Среди множества современных публикаций авторами выделяются работы, реализуемые в Научно-исследовательском институте механики при ННГУ им. Н.И. Лобачевского под руководством А.М. Брагова, А.К. Ломунова и др. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

За весь период изучения динамических свойств материалов так и не было представлено стандартизированных методов или серийно выпускаемого оборудования для проведения экспериментов. Разработки новых методов получения достоверных измерений напряжений и деформаций, не искажающих механические свойства материалов, продолжаются до сих пор [13, 14]. Несмотря на то, что за это время было создано большое количество средств для измерения усилий и деформаций от различных нагружающих устройств, исследования в этой области продолжаются.

Одним из фокусов, на который было направлено внимание исследователей, являются методы построения диаграмм деформирования материалов. В настоящее время наиболее распространенными являются следующие методы: метод копровых испытаний на растяжение или сжатие, кулачковый пластометр, методы Кольского и Тейлора. Также существуют и другие методики, однако их используют значительно реже, например: методика исследования раздачи кольцевых образцов, методика А.А. Ильюшина и В.С. Ленского, основанная на теории распространения одномерных упругопластических волн и распределения остаточных деформаций по длине образца, и т. д.

Однако даже в наиболее часто используемых методиках есть недостатки.

В методе копровых испытаний основными недостатками являются: небольшая скорость деформации образца, невозможность контролировать требуемый закон нагружения в процессе проведения испытаний, сложная картина распространения волн, которая не учитывается при построении диаграмм.

В методике расширяющегося кольца используются высокоскоростная киносъемка и теневая оптическая система с лазерным источником света и фотоумножителем [15] и тензорезисторы [16]. Однако такая методика позволяет зафиксировать только радиальную раздачу образца. Кроме того, в процессе обработки полученных результатов требуется дважды произвести дифференцирование полученной экспериментальной кривой, что часто приводит к существенным искажениям полученных результатов.

Наиболее простым и удобным методом определения прочностных и деформационных свойств материалов считается метод Тейлора [17, 18, 19, 20].

Среди таких методов на сегодняшний день выделяется метод Кольского [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31] по причине простоты реализации и хорошей теоретической обоснованности. Этот метод позволяет получить не только диаграмму деформирования, но и кривую изменения скорости деформации в течение всего хода испытания.

Все вышеперечисленные методы используются для получения большого количества различных динамических свойств материалов, которые необходимы для проведения сложных расчетов. Однако в некоторых случаях инженеру нужно определить значение конкретной характеристики материала, например его динамического модуля упругости, не прибегая к дорогим испытаниям в специальных лабораториях.

В настоящей статье на примере двухопорной шарнирной балки рассмотрен упрощенный метод определения динамического модуля упругости, а также коэффициента затухания колебаний, значения которых могут быть использованы при расчетах на динамические воздействия.

Материалы и методы

Объектом исследования является деревянная балка, шарнирно закрепленная с двух сторон в вертикальном положении. На середину балки установлен акселерометр, фиксирующий ее ускорения после приложения начального импульса (рис. 1). В исследовании использовался трехосный акселерометр ТБА, масса которого составляет 50 г, что не оказывает влияния на чистоту эксперимента. Пролет балки – 2560 мм, сечение – 197×40 мм (рис. 2).

Для двухопорной балки с сосредоточенной массой круговая частота вычисляется по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{M}} = \sqrt{\frac{1}{\delta \cdot M}}, \quad (1)$$

где c – жесткость системы, численно равна величине, вызывающей единичное перемещение точки сосредоточения масс; M – сосредоточенная масса, т; δ – удельное перемещение точки, м/кН.

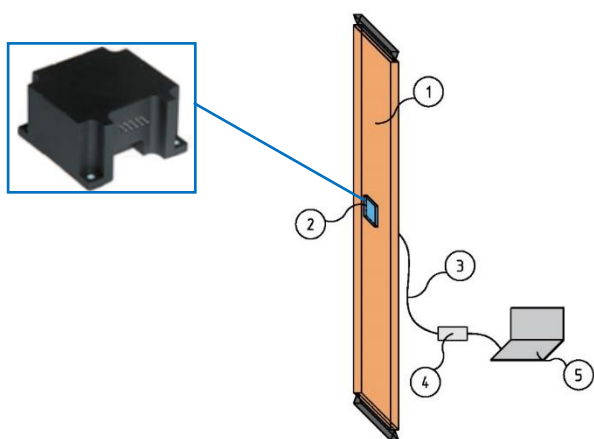


Рис. 1. Экспериментальная модель:

1 – испытуемый образец; 2 – трехосный акселерометр; 3 – контактный передатчик сигнала акселерометра; 4 – модуль обработки сигнала акселерометра; 5 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации

Fig. 1. Experimental model:

1 – test sample; 2 – triaxial accelerometer; 3 – contact accelerometer signal transmitter; 4 – accelerometer signal processing module; 5 – laptop for recording oscillation patterns and vibration measurement results

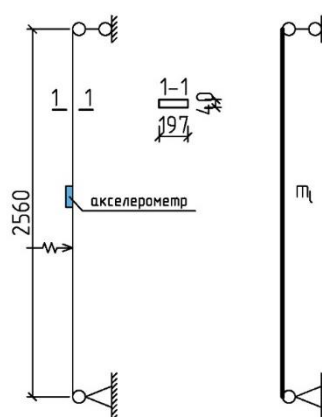


Рис. 2. Расчетная схема

Fig. 2. Design model

В случае, когда масса распределена по длине балки (рис. 2), формула (1) усложняется и принимает следующий вид:

$$\omega = \sqrt{\frac{EJ \cdot \pi^4}{\rho \cdot F \cdot l^4}} = \sqrt{\frac{EJ \cdot \pi^4}{m_l \cdot l^4}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, kH/m^2 ; J – момент инерции, м^4 ; ρ – плотность древесины балки, т/м^3 ; F – площадь сечения деревянной балки, м^2 ; m_l – погонная масса, т/м ; l – пролет балки, м .

У большинства вязкоупругих материалов модуль упругости, определенный в статических условиях, не совпадает с динамическим модулем упругости, поскольку при быстрых нагружениях не успевают проявиться эффекты, связанные с ползучестью или релаксацией материала. Именно такой эффект наблюдается в древесине при колебаниях конструкции, таким образом, в формуле (2) не может быть использован статический модуль упругости.

Проведение динамических исследований материалов является актуальной задачей, требующей больших финансовых и экономических затрат. Тем не менее, используя описанный экспериментальный стенд, можно оценить значение динамического модуля упругости материала (в данном случае древесины) без привлечения специализированных лабораторий. По найденным значениям вычисляется коэффициент неупругой работы, являющийся кон-

стантой материала и необходимый при расчете систем на собственные и вынужденные колебания.

В случае инструментальной записи процесса собственных колебаний системы круговая частота ω может быть найдена непосредственно из эксперимента. В этом случае динамический модуль упругости становится единственным неизвестным в уравнении (2) и может быть определен:

$$E_{\partial} = \frac{\omega^2 \cdot m_l \cdot l^4}{\pi^4 \cdot J}. \quad (3)$$

В результате приложения однократного импульса к неподвижной массе система будет совершать свободные колебания. Используя закон движения для свободных затухающих колебаний, можно записать уравнение движения акселерометра после воздействия мгновенного импульса:

$$y(t) = A \cdot e^{-\varepsilon t} \cos(\omega t), \quad (4)$$

где A – начальная амплитуда колебаний, м; ε – коэффициент затухания, c^{-1} ; ω – круговая частота, рад/с; t – время, с.

Закон изменения ускорений может быть записан при помощи дифференциальной зависимости $\ddot{y}(t) = \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -\omega^2 \cdot A \cdot e^{-\varepsilon t} \cos(\omega t)$ или, учитывая выражение (4), $\ddot{y}(t) = -\omega^2 \cdot y(t)$, откуда

$$y(t) = -\frac{\ddot{y}(t)}{\omega^2}. \quad (5)$$

Результаты и обсуждение

Результатом измерения акселерометра является набор ускорений a_i , представляющий собой численную запись зависимости $\ddot{y}(t)$. Согласно уравнению (5), графики перемещений будут пропорциональны графикам ускорений с коэффициентом $-\frac{1}{\omega^2}$. Ускорения, фиксируемые акселерометром, переведенные в перемещения, представлены на рис. 3.

По графику определено количество колебаний от момента удара до затухания процесса (129 колебаний за 8,776 с). В таблице приведены некоторые динамические характеристики балки.

Частота и период колебаний балки

Beam vibration frequency and cycle

Динамическая характеристика	Формула	Полученное значение
Период колебаний T , с	n/t	0,068
Частота ν , Гц	$1/T$	14,699
Круговая частота ω , рад/с	$2\pi\nu$	92,358

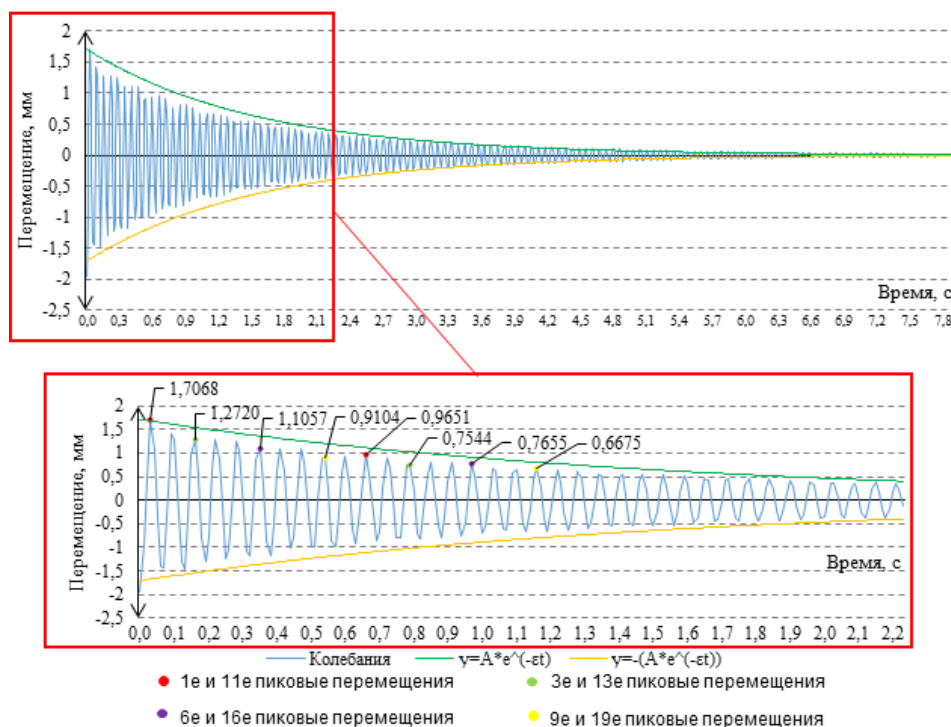


Рис. 3. Сравнение результатов измерений и аналитических вычислений
Fig. 3. Results of measurements and analytical calculations

Согласно (3), значение динамического модуля упругости составляет $E_d = 19,745 \cdot 10^6$ кН/м². Согласно исследованиям других авторов, например [32], модуль упругости сосны при описании колебаний следует принимать равным $\approx 180\text{--}200$ ГПа, что отличается от определенного экспериментально в пределах 1 %. Полученные результаты подтверждают возможность использования предложенного упрощенного метода определения динамических характеристик, основанного на измерении колебаний двухопорной балки. Метод может быть полезен, если данные о динамическом модуле упругости для изучаемого материала не представлены в справочной литературе, а его значение необходимо для выполнения каких-либо расчетов.

Для определения логарифмического декремента затухания необходимо вычислить натуральный логарифм отношения амплитуд двух соседних колебаний. Для снижения влияния погрешностей измерения акселерометра предлагается определение среднего из нескольких декрементов. Локальные погрешности измерений могут быть нивелированы, если вместо двух соседних колебаний использовать отношение колебаний через несколько фаз. Таким образом, формула коэффициента затухания будет выглядеть следующим образом:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{0,1}{T} \ln \frac{x_j}{x_{j+10}} \right)_i, \quad (6)$$

где x_j – текущее пиковое значение перемещения, м; x_{j+10} – десятое по счету пиковое значение перемещения, отсчитываемое от x_j , м; n – количество пиковых значений перемещений, взятых для определения коэффициента затухания; T – период, с.

В конкретном случае амплитуды сравнивались через десять периодов, что объясняет наличие в формуле коэффициента 0,1. Введением такого коэффициента была исключена погрешность, которая могла произойти, если измерения, фиксируемые акселерометром, не попали в действительный пик синусоиды.

При начальной амплитуде $A = 1,71 \cdot 10^3$ м и коэффициенте затухания $\varepsilon = 0,65$ с⁻¹ были получены прямая и обратная экспоненты затухания, показанные на рис. 3.

При вынужденных колебаниях от действия гармонических нагрузок необходимо знать динамический коэффициент μ , который, в свою очередь, определяется по формуле

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}}, \quad (7)$$

где $\lambda = \frac{\theta}{\omega}$ – отношение круговой частоты нагрузки и собственной круговой частоты; γ – коэффициент неупругой работы материала, учитывающий силы сопротивления.

Коэффициент неупругой работы является константой материала и оказывает значительное влияние на поведение системы в околорезонансных зонах (рис. 4). Коэффициент неупругой работы также может быть определен по результатам эксперимента, поскольку зависит от коэффициента затухания колебаний:

$$\gamma = \frac{2\varepsilon}{\omega} = \frac{\varepsilon T}{\pi}. \quad (8)$$

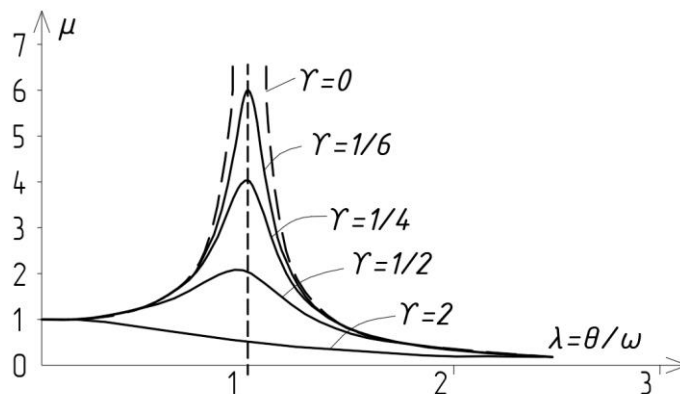


Рис. 4. График зависимости коэффициента неупругой работы материала
Fig. 4. Dependence of the coefficient of inelastic work of the material

Заключение

1. Определенный динамический модуль упругости на примере древесины сосны с высокой точностью совпадает со справочными значениями. Это означает, что предложенная методика может быть использована для оценки модулей упругости менее изученных материалов, а также композитных конструкций, например сталебетонных стержней.

2. Предложенная методика позволяет определить коэффициент затухания колебаний, который может быть применен при аналитическом моделировании колебаний и включен в уравнения движения.

3. Методика позволяет определить коэффициент неупругой работы материала, необходимый при расчете систем на вынужденные колебания. Основная особенность состоит в том, что данный параметр является физической константой материала и может быть использован при расчете гораздо более сложных механических систем.

Исследованием обоснована возможность применения упрощенной методики для определения динамических характеристик материалов. Безусловно, данный метод не может полноценно конкурировать с лабораторными испытаниями, проводимыми с помощью специальных установок. Однако предложенная методика является более простой и доступной для инженера, т. к. не требует изготовления большого количества образцов, специализированного программного обеспечения, а также проведения исследований в специальных лабораториях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аманов А.Н., Ильина Д.А., Шлычков С.В. Идентификация физико-механических свойств материалов // Научному прогрессу – творчество молодых : материалы XIV Международной молодежной научной конференции, 19–20 апреля 2019 г. В 4 частях. Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2019. Ч. 1. С. 129–131.
2. Константинов А.Ю. Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения материалов с использованием мерных стержней : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Нижний Новгород, 2018. 304 с.
3. Брагов А.М., Ломунов А.К., Южина Т.Н. Влияние вида напряженно-деформированного состояния на динамическую сжимаемость березы // Проблемы прочности и пластичности. 2020. Т. 82. № 3. С. 269–282.
4. Брагов А.М., Ломунов А.К. Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.
5. Смирнов В.А. Сравнительные динамические характеристики конструктивных материалов // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 3. С. 117–131.
6. Южина Т.Н. Исследование динамических свойств древесины при одноосном сжатии // Проблемы прочности и пластичности. 2022. № 3. С. 420–431.
7. Южина Т.Н. Высокоскоростное деформирование и разрушение некоторых пород древесины // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2022. 163 с.
8. Брагов А.М., Карихалу Б.Л., Петров Ю.В., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Смирнов И.В. Экспериментально-теоретическое исследование динамического

- деформирования и разрушения фибробетона // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 4. С. 57–63.
9. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Ламзин Д.А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении // Приволжский научный журнал. 2014. № 4 (32). С. 11–21.
 10. Dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y., Abali B.E. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates // *Advanced Structured Materials*. 2019. V. 108. P. 71–80.
 11. Ламзин Д.А., Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Новиков В.В., Гонов М.Е. Методические аспекты динамических испытаний хрупких материалов на сжатие // Приволжский научный журнал. 2019. № 4. С. 65–78.
 12. Ламзин Д.А., Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Новиков В.В., Чекарев Д.Т. Удельная энергоёмкость кирпича при динамическом нагружении // Приволжский научный журнал. 2019. № 4. С. 79–88.
 13. Захезин А.М., Колосова О.П., Воишелев П.Ю., Пакулев М.В. Оценка динамических характеристик материалов и механических систем экспериментальными методами // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 5. Ч. 1. С. 91–95.
 14. Турков А.В., Коробко В.И., Макаров А.А. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане при изменении динамических и статических нагрузок // Лесной журнал. 2016. № 5. С. 275–280.
 15. Perrone N. On the use ring test determination of rate sensitive material constants // *Experimental Mechanics*. 1968. V. 5. P. 232–236.
 16. Кокошвили С.М. Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов. Рига : Зинатне, 1978. 182 с.
 17. Рыжанский В.А., Минеев В.Н., Цыпкин В.И., Иванов А.Г. Экспериментальное исследование взрывного расширения тонких колец из отожженного алюминиевого сплава // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12. № 1. С. 120–124.
 18. Whiffin A.C. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. II: Tests on various metallic materials // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1948. V. 14. P. 289–299.
 19. Li H., Yu Z., Rong P., Wu Yu, Hui H., Zhang F. High strain rate response of in-situ TiB₂/7055 composite by Taylor impact // *Materials*. 2021. V. 14. 258. P. 1–13.
 20. Taylor G.I. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Theoretical considerations // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1948. Series A. V. 194. P. 289–299.
 21. Li J.-C., Chen G., Huang F.-L., Lu Y.-G. Load characteristics in Taylor impact test on projectiles with various nose shapes // *Metals*. 2021. V. 11. 713. P. 21.
 22. Woodward R.L., Burman N.M., Baxter B.J. An experimental and analytical study of the Taylor impact test // *Pergamon*. 1994. V. 15. № 4. P. 407–416.
 23. Juncheng L., Gang C., Yonggang L., Fenglei H. Investigation on the application of Taylor impact test to high-g loading // *Frontiers in materials*. 2021. V. 8. P. 21.
 24. Chen W., Song B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing, and applications. New York : Springer Science & Business Media, 2011. P. 388.
 25. Jankowiak T., Rusinek A., Lodygowski T. Validation of the Klepaczko–Malinowski model for friction correction and recommendations on split Hopkinson pressure bar // *Finite elements in analysis and design*. 2011. V. 47. № 10. P. 1191–1208.
 26. Klepaczko J., Malinowski Z. Dynamic frictional effects as measured from the split Hopkinson pressure bar // *International Union of Theoretical and Applied Mechanics* / K. Kawata ed., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1977. P. 403–416.
 27. Gray III G.T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing // *Mechanical testing and evaluation* / H. Kuhn, D. Medlin ed. 2000. V. 8. P. 462–476.
 28. Gray G.T., Blumenthal W.R. Split Hopkinson pressure bar testing of soft materials // *Mechanical Testing and Evaluation* / H. Kuhn, D. Medlin ed. ASM International, 2000. P. 488–496.
 29. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. Pulse shaping techniques for testing high-strength steel with a split Hopkinson pressure bar // *Experimental Mechanics*. 2005. V. 45. P. 186–195.
 30. Forrestal M.J., Wright T.W., Chen W. The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test // *International Journal of Impact Engineering*. 2007. V. 34 (3). P. 405–411.

31. Feng J., Jiang M., Xu H., Li Z., Wu Z. Influence of the end cap deformation of a hollow transmission bar on the hollow split Hopkinson pressure bar test results // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. V. 112. P. 116–124.
32. Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М., Шлычков С.В. Идентификация упругих свойств древесины // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10. Ч. 12. С. 2625–2629.

REFERENCES

1. Amanov A.N., Ilyina D.A., Shlychov D.A. Identification of physical and mechanical properties of materials. In: *Proc. 14th Sci. Conf. 'Scientific Progress – Creativity of the Young'*, Pt. 1. Yoshkar-Ola, 2019. Pp. 129–131. (In Russian)
2. Konstantinov A.Yu. Experimental and theoretical approach to high-speed deformation and destruction of materials using dimensional rods. DSc Thesis. Nizhny Novgorod, 2018. 304 p. (In Russian)
3. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Stress-strain state effect on birch dynamic compressibility. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2020; 82 (3): 269–282. (In Russian)
4. Bragov A.M., Lomunov A.K. The Kola method in studying processes of high-speed deformation of materials of various physical nature. Nizhny Novgorod, 2017. 148 p. (In Russian)
5. Smirnov V.A. Comparative dynamic characteristics of structural materials. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2022; 3: 117–131. (In Russian)
6. Yuzhina T.N. Dynamic properties of wood under uniaxial compression. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2022; 3: 420–431. (In Russian)
7. Yuzhina T.N. High-speed deformation and destruction of some types of wood. PhD Thesis. Moscow, 2022. 163 p. (In Russian)
8. Bragov A.M., Karikhalu B.L., Petrov Yu.V., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Smirnov I.V. Experimental and theoretical study of dynamic deformation and destruction of fiber concrete. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2014; 80 (4): 57–63. (In Russian)
9. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Lamzin D.A. Mechanical properties of fine-grained concrete under dynamic loading. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2014; 4 (32): 11–21. (In Russian)
10. Dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y., Abali B.E. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates. *Advanced Structured Materials*. 2019; 108: 71–80.
11. Lamzin D.A., Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Novikov V.V., Gonov M.E. Methodological aspects of dynamic tests of brittle materials for compression. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2019; 4: 65–78. (In Russian)
12. Lamzin D.A., Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Novikov V.V., Chekmarev D.T. Specific energy consumption of bricks under dynamic loading. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2019; 4: 79–88.
13. Zakhezin A.M., Kolosova O.P., Voitelev P.Yu., Pakulev M.V. Experimental evaluation of dynamic characteristics of materials and mechanical systems. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2015; 5 (1): 91–95. (In Russian)
14. Turkov A.V., Korobko V.I., Makarov A.A. Experimental studies of systems of cross beams made of wooden elements on a square plan when dynamic and static loads change. *Lesnoi zhurnal*. 2016; 5: 275–280. (In Russian)
15. Perrone N. On the use ring test determination of rate sensitive material constants. *Experimental Mechanics*. 1968; 5: 232–236.
16. Kokoshvili S.M. Methods of dynamic testing of rigid polymer materials. Riga: Zinatne, 1978. 182 p. (In Russian)
17. Ryzhansky V.A., Mineev V.N., et al. Experimental investigation of explosive expansion of thin annealed aluminum alloy rings. *Fizika goreniya i vzryva*. 1976; 12(1): 120–124. (In Russian)
18. Whiffin A.C. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Tests on various metallic materials. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1948; 14: 289–299.
19. Li H., Yu Z., Rong P., Wu Yu, Hui H., Zhang F. High strain rate response of in-situ TiB₂/7055 composite by Taylor impact. *Materials*. 2021; 14 (258): 1–13.

20. Taylor G.I. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Theoretical considerations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1948;194: 289–299.
21. Li J.-C., Chen G., Huang F.-L., Lu Y.- G. Load characteristics in taylor impact test on projectiles with various nose shapes. *Metals*. 2021; 11 (713): 21.
22. Woodward R.L., Burman N.M., Baxter B.J. An experimental and analytical study of the Taylor impact test. *Pergamon*. 1994; 15. (4): 407–416.
23. Juncheng L., Gang C., Yonggang, L., Fenglei H. Investigation on the application of taylor impact test to high-g loading. *Frontiers in materials*. 2021; 8: 21.
24. Chen W., Song B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: Design, testing, and applications. New York: Springer Science & Business Media, 2011. 388 p.
25. Jankowiak T., Rusinek A., Lodygowski T. Validation of the Klepaczko–Malinowski model for friction correction and recommendations on Split Hopkinson Pressure Bar. *Finite elements in analysis and design*. 2011; 47 (10): 1191–1208.
26. Klepaczko J., Malinowski Z. Dynamic frictional effects as measured from the split Hopkinson pressure bar. *International Union of Theoretical and Applied Mechanics*, K. Kawata Ed., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1977. Pp. 403–416.
27. Gray III G.T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing. *Mechanical Testing and Evaluation*. 2000; 8: 462–476.
28. Gray G.T., Blumenthal W.R. Split Hopkinson pressure bar testing of soft materials. *Mechanical Testing and Evaluation*, H. Kuhn, D. Medlin Eds., ASM International, 2000. Pp. 488–496.
29. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. Pulse shaping techniques for testing high-strength steel with a split Hopkinson pressure bar. *Experimental Mechanics*. 2005; 45: 186–195.
30. Forrestal M.J., Wright T.W., Chen W. The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test. *International Journal of Impact Engineering*. 2007; 34 (3): 405–411.
31. Feng J., Jiang M., Xu H., Li Z., Wu Z. Influence of the end cap deformation of a hollow transmission bar on the hollow split Hopkinson pressure bar test results. *International Journal of Impact Engineering*. 2017; 112: 116–124.
32. Saldaeva E.Yu., Tsvetkova E.M., Shlychkov S.V. Identification of elastic properties of wood. *Fundamentalnye issledovaniia*. 2013; 10 (12): 2625–2629. (In Russian)

Сведения об авторах

Хазов Павел Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, зав. лабораторией, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, khazov.nngasu@mail.ru

Шкода Ирина Васильевна, аспирант, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85; ассистент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

Тягунова Лидия Юрьевна, ст. преподаватель, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, tyagunovaly@yandex.ru

Authors Details

Pavel A. Khazov, PhD, A/Professor, Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, khazov.nngasu@mail.ru

Irina V. Shkoda, Research Assistant, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 85, Belinsky Str., 603024, Nizhny Novgorod, Russia; Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

Lidiia Yu. Tjagunova, Senior Lecturer, Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, tyagunovaly@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 30.06.2023
Одобрена после рецензирования 18.07.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 30.06.2023
Approved after review 18.07.2023
Accepted for publication 09.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 102–112.

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 (6): 102–112.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-102-112

EDN: ZXUAIO

РАСЧЕТ ДВУХОСНОГО ЮСТИРОВОЧНОГО ЗЕРКАЛА РЕЗОНАТОРА ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Владислав Иванович Максак, Татьяна Алексеевна Трепутнева

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

Аннотация. *Актуальность.* В настоящее время лазерные системы применяют на многих этапах строительного производства. Они позволяют решать инженерные задачи с большой точностью. В работе рассмотрена конструкция двухосного юстировочного узла.

Цель – расчет двухосного юстировочного зеркала резонатора оптического квантового генератора.

Методы. Энергетическим методом определены деформации упругих элементов. Аналитически определена связь между углами поворота юстировочного винта и углом поворота нормали зеркала резонатора.

Результаты. Дана оценка влияния конструкционных параметров узла на его рабочие характеристики. Проведен сравнительный анализ чувствительности двухосного и одноосного узлов юстировочного зеркала. Расчетами показано преимущество двухосного узла. Результаты могут быть применимы в строительной лазерной технике.

Ключевые слова: оптический квантовый генератор, резонатор, расчет юстировочного узла, энергетический метод

Для цитирования: Максак В.И., Трепутнева Т.А. Расчет двухосного юстировочного зеркала резонатора оптического квантового генератора // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 102–112. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-102-112. EDN: ZXUAIO

ORIGINAL ARTICLE

TWO-AXIAL ALIGNMENT MIRROR FOR OPTICAL-QUANTUM GENERATOR RESONATOR

Vladislav I. Maksak, Tatyana A. Treputneva

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. There are currently laser systems used at many stages of construction. They allow to solve engineering problems with great accuracy. The paper considers the design of a two-axis alignment unit.

Purpose: The aim of this work is to design the two-axial alignment mirror of the optical quantum oscillator resonator.

Methodology: Deformation of elastic elements are determined by the energy method. The relation between rotation angles of the alignment screw and the resonator mirror normal is determined analytically.

Research findings: The influence of design parameters of the assembly on its performance is evaluated. A comparative analysis is presented for the sensitivity of two-axial and uniaxial knots of the alignment mirror. The advantage of the two-axial knot is shown by calculations. The obtained results can be applied in laser construction technology.

Keywords: optical quantum generator, resonator, alignment mirror, energy method

For citation: Maksak V.I., Treputneva T.A. Two-axial alignment mirror for optical-quantum generator resonator. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 102–112. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-102-112. EDN: ZXUAIO

Конструкции узлов для юстировки зеркал резонатора для исследования атмосферы могут найти свое применение и в строительной лазерной технике. В работе [1] показаны конструкция и расчетная схема одноосного юстировочного узла зеркала резонатора, используемого в строительной измерительной технике [2, 3]. Приведены расчеты рабочих перемещений элементов конструкции узла.

Внешний вид двухосного юстировочного узла показан на рис. 1, общие расчетные схемы – на рис. 2–4.

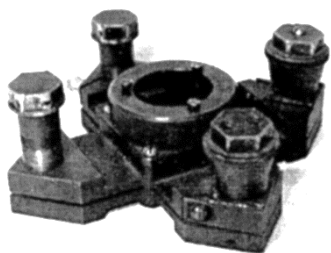


Рис. 1
Fig. 1

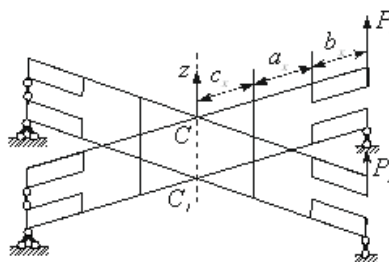


Рис. 2
Fig. 2

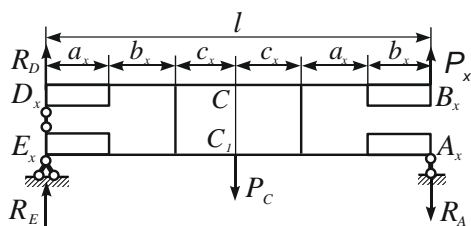


Рис. 3
Fig. 3

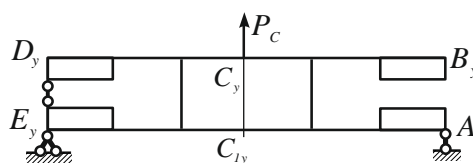


Рис. 4
Fig. 4

Вычисление перемещений происходит с использованием энергетического метода [4, 5]. Общая расчетная схема с определенными условностями показана на рис. 2. Системе в плоскости XYZ придается индекс x , а в плоскости YOZ – индекс y . При действии в системе X силы P_x условие нагружения

системы Y показано на рис. 3. Усилие связи P_C приводит к перемещению δ_{Cy} точки C и к ее развороту в ϕ_{Cy} плоскости Y . Определение перемещения δ_{Cy} необходимо для раскрытия статической неопределенности системы X . Определение перемещения δ_{Cy} имеет самостоятельное значение. В соответствии с этим, прежде всего, рассмотрим схемы, представленные на рис. 2–4. Определение перемещения δ_{Cy} (P_C) является для системы Y статически неопределимой задачей.

Для раскрытия статической неопределенности используем каноническое уравнение метода сил

$$\delta_{1P_C} + \delta_{11}x_1 = 0. \quad (1)$$

Эквивалентная система с лишней неизвестной X_1 представлена на рис. 5.

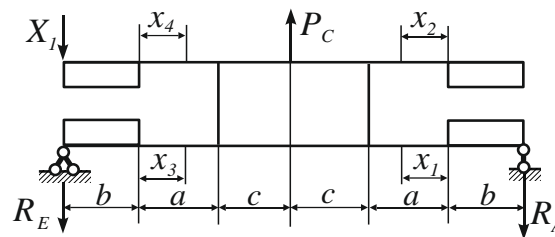


Рис. 5
Fig. 5

В формуле (1), согласно рис. 4, $1P_C$ – перемещение точки D_y по направлению силы X_1 , но под действием только силы P_C ; δ_{11} – перемещение точки D_y по направлению силы X_1 под действием единичной силы, приложенной также в точке D_y по направлению силы X_1 .

Для записи интеграла Мора определим моменты на всех участках от силы P_C и единичной силы, приложенной в точке D_y :

$$M_{x_1} = M_{x_3} = -\frac{P_C}{2}(b+x); \quad (2)$$

$$M_{x_2} = M_{x_4} = 0; \quad (3)$$

$$M_{1x_1} = M_{1x_2} = 0; \quad (4)$$

$$M_{1x_3} = 1(b+x_3); \quad (5)$$

$$M_{1x_4} = 1(b+x_4). \quad (6)$$

Интеграл Мора для определения перемещения δ_{1P_C} имеет вид

$$\delta_{1P_C} = \int_a \left[\frac{-\frac{P_C}{2}(b+x_3)}{EI_3} \right] (b+x_3) dx.$$

После интегрирования получим

$$\delta_{1P_C} = -\frac{P_C a}{2EJ_3} \left(\frac{a^2}{3} + ab + b^2 \right). \quad (7)$$

При определении перемещения δ_{11} моменты (5) и (6) в интеграле Мора [1] являются одновременно моментами M_{li} и M_{xi} , т. е.

$$\delta_{11} = \int_a \frac{(b+x_3)^2 dx}{EJ_4} + \int_a \frac{[-(b+x_4)]^2}{EJ_4} dx.$$

После интегрирования с учетом, что $J_1 = J_3 = J_4$, получим

$$\delta_{11} = \frac{2a}{EJ_1} \left(\frac{a^2}{3} + ab + b^2 \right). \quad (8)$$

Решение уравнения (1) с учетом (7) и (8) определяет значение X_1 :

$$X_1 = \frac{-\delta_{1P_C}}{\delta_{11}} = \frac{P_C}{4}. \quad (9)$$

Для вычисления перемещения δ_{Cy} необходимо определить расчетные моменты от силы P_C с учетом X_1 и от единичной силы, приложенной в точке C по направлению силы P_C .

Учтем, что $R_A = \frac{P_C}{2}$ и $R_E = \frac{P_C}{4}$. Тогда

$$\begin{cases} M_{x_1} = -\frac{P}{2}(b+x_1); \\ M_{x_2} = 0; \\ M_{x_3} = -\frac{P_C}{4}(b+x_3); \\ M_{x_4} = \frac{P_C}{4} - (b+x_4). \end{cases} \quad (10)$$

Моменты от единичной силы определяются заменой в (10) P_C на 1. С учетом этого получим

$$\begin{aligned} \delta_{Cy} = & \frac{1}{EJ_1} \int_a \left[-\frac{P_C}{2}(b+x_1) \right] \left[-\frac{1}{2}(b+x_1) \right] dx + \frac{1}{EJ_3} \int_a \left[-\frac{P_C}{4}(b+x_3) \right] dx + \\ & + \frac{1}{EJ_4} \int_a \left[-\frac{P_C}{4}(b+x_4) \right] \left[-\frac{1}{4}(b+x_4) \right] dx. \end{aligned}$$

После интегрирования и простого преобразования получим

$$\delta_{Cy} = \frac{3P_C \cdot a}{8EJ_1} \left(\frac{a^3}{3} + ab + b^2 \right). \quad (11)$$

Для расчета перемещения φ_{Cy} требуется знание моментов от единичного момента, приложенного в точке C . А это, в свою очередь, является статически неопределимой задачей. Для этой задачи эквивалентная система с лишней неизвестной X_1 представлена на рис. 6. Раскрытие статической неопределимости производится с помощью канонического уравнения

$$\delta_{1M_C} + \delta_{11}X_1 = 0, \quad (12)$$

где δ_{1M_C} – перемещение точки D_y по направлению силы X_1 под действием внешнего момента $M_C = 1$; δ_{11} – перемещение точки D_y по направлению силы X_1 под действием единичной силы, приложенной в точке D_y и направленной по силе X_1 .

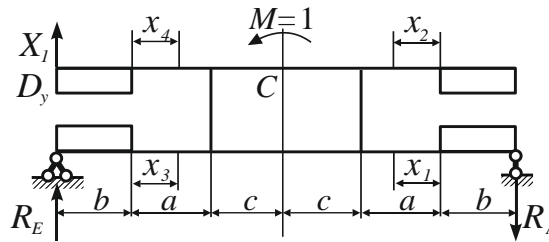


Рис. 6

Fig. 6

Для определения перемещений и δ_{1M_C} , и δ_{11} запишем для всех участков моменты от внешней нагрузки $M_C = 1$ и от единичной силы, приложенной в точке D_y .

$$\begin{cases} M_{x_1} - R_A(b + x_1) = \frac{-1}{2(a + b + c)}(b + x_1); \\ M_{x_2} = 0; \\ M_{x_3} = R_E(b + x_3) = \frac{1}{2(a + b + c)}(b + x_3); \\ M_{x_4} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} M_{1x_1} = M_{1x_2} = 0; \\ M_{1x_3} = -1(b + x_3); \\ M_{1x_4} = 1(b + x_4). \end{cases} \quad (14)$$

При этом

$$\delta_{1M_C} = \frac{1}{EJ_3} \int_a^{b+x_3} \frac{(b+x_3)}{2(a+b+c)} [-1(b+x_3)] dx.$$

После интегрирования получим

$$\delta_{1M_c} = -\frac{a}{2EJ_3(a+b+c)} \left(\frac{a^2}{3} + ab + b^2 \right). \quad (15)$$

При вычислении δ_{11} моменты являются моментами M_x и M_{1x} :

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ_3} \int_a^{\infty} [-1(b+x_3)]^2 dx + \frac{1}{EJ_4} \int_a^{\infty} (b+x_4)^2 dx.$$

После вычисления получим

$$\delta_{11} = \frac{2a}{EJ} \left(\frac{a^2}{2} + ab + b^2 \right). \quad (16)$$

Значение X_1 находится из уравнения (12) с учетом (15) и (16):

$$X_1 = \frac{1}{4(a+b+c)}. \quad (17)$$

Далее для расчета перемещения φ_{cy} моменты M_{1x} от единичного момента M_c должны определиться с учетом X_1 (рис. 6).

$$\begin{cases} R_A = \frac{1}{2(a+b+c)}; \\ R_E = \frac{1}{4(a+b+c)}. \end{cases} \quad (18)$$

При этом

$$\begin{cases} M_{1x_1} = -\frac{(b+x_1)}{2(a+b+c)}; \\ M_{1x_2} = 0; \\ M_{1x_3} = \frac{(b+x_3)}{4(a+b+c)}; \\ M_{1x_4} = \frac{(b+x_4)}{4(a+b+c)}. \end{cases} \quad (19)$$

Моменты от внешней нагрузки P_c определяются формулами (10). Значения моментов (10) и (19) позволяют определить и φ_{cy} :

$$\begin{aligned} \varphi_{cy} = & \frac{1}{EJ_1} \int_a^{\infty} \left[-\frac{P_c}{2}(b+x_1) \right] \left[-\frac{(b+x_1)}{2(a+b+c)} \right] dx + \\ & + \frac{1}{EJ_3} \int_a^{\infty} \left[-\frac{P_c}{4}(b+x_3) \right] \frac{(b+x_3)}{4(a+b+c)} dx + \frac{1}{EJ_4} \int_a^{\infty} \left[-\frac{P_c}{4}(b+x_4) \right] \frac{(b+x_4)}{4(a+b+c)} dx. \end{aligned}$$

После интегрирования и преобразования получим

$$\varphi_{Cy} = \frac{P_C \cdot a}{8EJ_1(a+b+c)} \left(\frac{a^2}{3} + ab + b^2 \right). \quad (20)$$

Усилие P_C , зависящее от силы P_x , может быть найдено из условия совместности перемещения точки C системы X под действием сил P_x и P_C и системы Y под действием силы P_C . Для определения δ_{Cx} в системе X нужно в точке C приложить единичную силу по направлению перемещения δ_{Cx} . В свою очередь, для определения моментов от этой силы можно использовать схему на рис. 5, приняв в формулах (10) $P_C = 1$, т. е.

$$\begin{cases} M_{1x_1} = -\frac{(b+x_1)}{2}; \\ M_{1x_2} = 0; \\ M_{1x_3} = -\frac{(b+x_3)}{4}; \\ M_{1x_4} = -\frac{(b+x_4)}{4}. \end{cases} \quad (21)$$

Для записи моментов M_x от сил P_x и P_C определим реакции (рис. 3):

$$\begin{aligned} R_A &= P_x - \frac{P_C}{2}; \\ R_E &= R_D = \frac{P_C}{4}. \end{aligned} \quad (22)$$

В соответствии с этим формулы моментов M_x примут вид

$$\begin{cases} M_{x_1} = -\frac{(P_x - P_C)(b+x_1)}{2}; \\ M_{x_2} = P_x(b+x_2); \\ M_{x_3} = \frac{P_C}{4}(b+x_3); \\ M_{x_4} = \frac{P_C}{4}(b+x_4). \end{cases} \quad (23)$$

С учетом (21) и (23) формула для определения перемещения δ_{Cx} имеет вид

$$\begin{aligned} \delta_{Cx} &= \frac{1}{EJ_1} \int_a \left[-\frac{(P_x - P_C)(b+x_1)}{2} \right] \left[-\frac{(b+x_1)}{2} \right] dx + \\ &+ \frac{1}{EJ_3} \int_a \frac{P_C}{4}(b+x_3) \left[-\frac{(b+x_3)}{4} \right] dx + \frac{1}{EJ_4} \int_a \frac{P_C}{4}(b+x_4) \left[-\frac{(b+x_4)}{4} \right] dx. \end{aligned}$$

После интегрирования и преобразования получим

$$\delta_{Cx} = \left(\frac{P_x}{2} + \frac{3}{2}P_C \right) \frac{a}{EJ_1} \left(\frac{a^2}{3} + ab + b^2 \right). \quad (24)$$

Усилие P_C находится из условия совместности перемещений

$$\delta_{Cx} = \delta_{Cy}. \quad (25)$$

С учетом (24) и (11) из (25) получим

$$P_C = \frac{2}{3} P_x. \quad (26)$$

Знание значения P_C позволяет перейти к определению искомых значений угла разворота точки C и перемещения точки B в системе X (рис. 3) под действием силы P_x .

Моменты M_x согласно (23) и (26) имеют следующие значения:

$$\begin{cases} M_{x_1} = -\frac{2}{3} P_x (b + x_1); \\ M_{x_2} = P_x (b + x_2); \\ M_{x_3} = \frac{1}{6} P_x (b + x_3); \\ M_{x_4} = \frac{1}{6} P_x (b + x_4). \end{cases} \quad (27)$$

Моменты M_{1x} от единичного момента $M_C = 1$ имеют те же значения, что и в формулах (19). Учитывая это, формулы (27) позволяют определить φ_{Cx} угол разворота точки C силой P_x

$$\begin{aligned} \delta_{Cx} = & \frac{1}{EI_1} \int_a \left[-\frac{2}{3} P_x (b + x_1) \right] \left[-\frac{(b + x_1)}{2(a + b + c)} \right] dx + \\ & + \frac{1}{EI_3} \int_a \frac{P_x (b + x_3)}{6} \frac{(b + x_3)}{4(a + b + c)} dx + \frac{1}{EI_4} \int_a \frac{P_x (b + x_4)}{6} \frac{(b + x_4)}{4(a + b + c)} dx. \end{aligned}$$

После интегрирования и преобразования получим

$$\varphi_{Cx} = \frac{5P_x a}{12EJ_1(a + b + c)} \left(\frac{a^2}{3} + ab + b^2 \right). \quad (28)$$

Для определения перемещения δ_{Bx} в точке B нужно приложить единичную силу по направлению P_x . При этом моменты M_{1x} определяются по (27) с заменой P_x на силу, равную единице. С учетом этого

$$\begin{aligned} \delta_{Bx} = & \frac{1}{EJ_1} \int_a P_x \left[-\frac{2}{3} (b + x_1) \right]^2 dx + \frac{1}{EJ_2} \int_a P_x (b + x_2)^2 dx + \\ & + \frac{1}{EJ_3} \int_a \frac{P_x (b + x_3)^2}{6} dx + \frac{1}{EJ_4} \int_a \frac{P_x (b + x_4)^2}{6} dx. \end{aligned}$$

Учитывая, что $J_1 = J_3 = J_4$, после интегрирования получим

$$\delta_{Bx} = \left(\frac{7J_2 + 9J_1}{9J_1J_2} \right) \frac{P_x a}{E} \left(\frac{a^2}{3} + ab + b^2 \right). \quad (29)$$

Исключением P_x из (28) и (29) определяется зависимость φ_{Cx} от δ_{Bx} :

$$\varphi_{Cx} = \frac{15J_2\delta_{Bx}}{4(9J_1 + 7J_2)(a + b + c)}. \quad (30)$$

С учетом того, что $\delta_{Bx} = Sn_x$, а также $2(a + b + c) = l$, получим

$$\varphi_{Cx} = \frac{15h_2^3 Sn_x}{2(9h_1^3 + 7h_2^3)l}. \quad (31)$$

Эта формула определяет поворот точки C в плоскости X при повороте регулировочного винта в этой же плоскости на n_x оборотов. Согласно (20), одновременно с этим будет происходить и поворот точки C в плоскости Y . Заменяя в (20) P_C на P_y и исключая P_x как из (20), так и из (29), получим и связь между φ_{Cy} и δ_{Bx} :

$$\varphi_{Cx} = \frac{3I_2\delta_{Bx}}{4(9I_1 + 7I_2)(a + b + c)}$$

или по аналогии с (31):

$$\varphi_{Cx} = \frac{3h_2^3 S_{nx}}{2(9h_1^3 + 7h_2^3)l}. \quad (32)$$

Следует отметить, что поворот $\varphi_{Cy}(n_x)$ в 5 раз меньше поворота $\varphi_{Cx}(n_x)$.

Очевидно, что по аналогии с (31) и (32) при вращении регулировочного винта в плоскости Y будут происходить и повороты $\varphi_{Cy}(n_y)$ и $\varphi_{Cx}(n_y)$. Последнее замечание позволяет записать общие формулы для определения углов поворота зеркала резонатора при вращении регулировочных винтов:

$$\varphi_{Cx} = \varphi_{Cx}(n_x) + \varphi_{Cx}(n_y);$$

$$\varphi_{Cy} = \varphi_{Cy}(n_y) + \varphi_{Cy}(n_x),$$

или, с учетом (31) и (32), получим

$$\begin{cases} \varphi_{Cx} = \frac{3h_2^3 S}{2(9h_1^3 + 7h_2^3)l} (5n_x + n_y); \\ \varphi_{Cy} = \frac{3h^3 S}{2(9h_1^3 + 7h_2^3)l} (5n_y + n_x). \end{cases} \quad (33)$$

Выводы

В качестве критерия соотношения чувствительности узлов можно выбрать величину n . Так, к примеру, величина $n = \varphi_{C_1} / \varphi_{C_i}$ говорит о том, во

сколько раз чувствительность двухосного узла выше чувствительности одноосного узла.

Принимая во внимание то, что $l = (2a + 2b + 2c)$, получим $n_2 \approx 1,37$, т. е. чувствительность двухосного узла примерно в 1,37 раза выше чувствительности одноосного узла. Для сопоставления узлов необходимо знать соотношение $\alpha = h_1 / h_2$. При этом выражение формулы параметра n , с учетом (31), имеет вид

$$n = \frac{2(7 + 9\alpha^3)}{15(1 + \alpha^3)},$$

при $\alpha = 1 \quad n \approx 1,06;$
 $\alpha = 2 \quad n \approx 1,17;$
 $\alpha = 3 \quad n \approx 1,19;$
 $\alpha = 4 \quad n \approx 1,195;$
 $\alpha = 5 \quad n \approx 1,197.$

Данный анализ говорит о том, что соотношение влияет на различия в чувствительности узлов. Так, при изменении α от $\alpha = 1$ до $\alpha = 2$ чувствительность увеличивается примерно в 5 раз, а при изменении α до $\alpha = 3$ чувствительность возрастает примерно в 15 раз.

В заключение следует отметить очень высокую чувствительность узлов. Так, к примеру, при $\alpha = 3$, $l = 8 \cdot 10^{-2}$ м и $S = 5 \cdot 10^{-4}$ м на один оборот регулировочного винта приходится угол поворота зеркала $\varphi_C = 2,23 \cdot 10^{-4}$ рад или $1,27 \cdot 10^{-2}$ град, что указывает на преимущество двухосного юстировочного зеркала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максак В.И., Пислярчук А.В. Расчет одноосного юстировочного узла зеркал резонатора оптического квантового генератора // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 143–149.
2. Грузинов В.В., Иванищев В.И., Коугия В.А. и др. Лазерные геодезические приборы в строительстве. Москва : Недра, 1977. 165 с.
3. Большаков В.Д., Новак В.Е., Сытник В.С. и др. Лазеры в строительстве. Москва : Знание, 1981. 48 с.
4. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. Москва : Высшая школа, 2009. 560 с.
5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 542 с.

REFERENCES

1. Maksak V.I., Pislyarchuk A.V. Design of uniaxial adjustable mirrors of resonant optical-quantum generator. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2015; (4): 143–149. (In Russian)
2. Gruzinov V.V., Ivanishchev V.I., Kougiya V.A., et al. Laser geodetic devices in construction. Moscow: Nedra, 1977. 165 p. (In Russian)

3. *Bol'shakov V.D., Novak V.E., Sytnik V.S., et al.* Lasers in construction. Moscow: Znanie, 1981. 48 p. (In Russian)
4. *Aleksandrov A.V., Potapov V. D., Derzhavin B.P.* Strength of Materials. Moscow: Vysshaya shkola, 2009. 560 p. (In Russian)
5. *Feodos'ev V.I.* Strength of materials. Moscow, 2019. 542 p. (In Russian)

Сведения об авторах

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

Трепутнева Татьяна Алексеевна, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tta2019tta@yandex.ru

Authors Details

Vladislav I. Maksak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia

Tatyana A. Treputneva, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 664003, Tomsk, Russia, tta2019tta@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 24.11.2023
Одобрена после рецензирования 01.12.2023
Принята к публикации 01.12.2023

Submitted for publication 24.11.2023
Approved after review 01.12.2023
Accepted for publication 01.12.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 113–124.

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 (6): 113–124.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.016

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-113-124

EDN: WOJCIZ

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОГО СТЕРЖНЯ

Андрей Викторович Мищенко

Новосибирский государственный

архитектурно-строительный университет (Сибстрин),

г. Новосибирск, Россия

Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище,

г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Неоднородные конструкции обладают рядом существенных преимуществ перед классическими однородными. Регулирование их напряженно-деформированного состояния дает возможность более эффективно адаптировать систему к заданным термосиловым воздействиям и в результате получить дополнительные эффекты экономии массы и стоимости конструкции. Практическое использование неоднородных элементов конструкций в настоящее время требует создания инженерных методов расчета, обладающих приемлемой трудоемкостью, необходимой точностью и универсальностью.

Целью настоящей работы является совершенствование способов построения комплекса необходимых физических соотношений в задачах термосилового пространственного деформирования неоднородных стержней.

Методы исследования. Для расчетной модели стержня Тимошенко применены аппроксимации функций поперечных сдвигов и мембранная аналогия для деформаций сдвига при кручении. Пространственный призматический стержень прямоугольного сечения образован из квазиоднородных частей (фаз), выполненных из различных конструкционных материалов.

Результаты. Получены расчетные соотношения для термосилового пространственного изгиба с растяжением, поперечного сдвига и кручения. Данные уравнения содержат жесткостные характеристики нулевого, первого и второго порядков при изгибе с растяжением, сдвиговые и крутильную жесткости сечения. Их применение позволяет компактно сформулировать физические зависимости и краевую задачу пространственного деформирования неоднородного стержня.

Ключевые слова: структурно-неоднородный стержень, пространственный изгиб, жесткостные характеристики неоднородного сечения, кручение неоднородного стержня, мембранная аналогия

Для цитирования: Мищенко А.В. Напряженно-деформированное состояние пространственного структурно-неоднородного стержня // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 113–124. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-113-124. EDN: WOJCIZ

ORIGINAL ARTICLE

STRESS-STRAIN STATE OF ROD WITH HETEROGENEOUS STRUCTURE**Andrey V. Mishchenko***Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russia**Order of Zhukov Novosibirsk Higher Military Command School,
Novosibirsk, Russia*

Abstract. Heterogeneous structures have a number of significant advantages over classical homogeneous. Their stress-strain state control allows to more effectively adapt the system to given thermal conditions and, as a result, additionally save weight and cost of the structure. The practical use of elements with heterogeneous structure, requires the creation of engineering calculation approaches with acceptable labor intensity, accuracy and versatility.

Purpose: The improvement of design methods implying physical relations in problems of thermal power deformation of rods with heterogeneous structure.

Design/methodology: The Timoshenko rod model design involves the approximation of transverse shear functions and membrane analogy of shear deformation in torsion. A three-dimensional prismatic rod having a rectangular cross-section, is obtained from quasi-homogeneous parts (phases) made of various structural materials.

Research findings: Theoretical calculations are obtained for thermal power spatial bending with tension, transverse shear and torsion. These equations contain stiffness characteristics of zero, first- and second-order tensile bending, shear and torsional stiffnesses of the section.

Practical implication: These equations can be used to compactly formulate physical relations and the boundary value problem of spatial deformation of rods with heterogeneous structure.

Keywords: rod with heterogeneous structure, spatial bending, rigidity, non-uniform section, torsion, membrane analogy

For citation: Mishchenko A.V. Stress-strain state of rod with heterogeneous structure. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 113–124. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-113-124. EDN: WOJCIZ

Введение

Неоднородные конструкции, запроектированные с использованием принципов рационального проектирования, обладают рядом неоспоримых преимуществ перед однородными [1, 2, 3, 4]. Основными из них являются: а) способность более эффективно адаптироваться к заданным физическим полям [5]; б) возможность регулирования напряженно-деформированного состояния; в) получение экономии массы и стоимости материалов конструкции. В силу сложности объекта исследования – пространственно деформируемого неоднородного стержня, испытывающего силовое и тепловое воздействия, в литературе обычно рассматриваются различные частные случаи расчетных схем: плоские задачи [1, 6, 7, 8], простые виды воздействия на отдельные элементы конструкций [9, 10] либо, при усложнении воздействий, – стержни простой геометрической формы с частными случаями неоднородности [9]. Спецификой неоднородных конструкций является их чувствительность к тепловым воздействиям [5, 11, 12]. В ряде работ уточненные методы расчета

строятся без привлечения гипотез теории стержней. Так, в работе [13] для построения инженерной теории сопротивления неоднородных стержней применено разложение решения исходной задачи в ряд по производным деформаций сопутствующей задачи однородного стержня. В нулевом приближении предложенный метод дает классическое решение. В работах [14, 15] для исследования пространственных задач применен метод асимптотического расщепления. Данные подходы [13, 14, 15], а также численные [7, 16, 17, 18] и экспериментальные [8, 19] исследования весьма ценны для оценки различных приближенных методов.

При практическом использовании неоднородных конструкций в настоящее время требуется создание инженерных методов расчета, обладающих приемлемой трудоемкостью и универсальностью, позволяющих выполнять оценку напряженно-деформированного состояния при комбинированном пространственном воздействии. В настоящей работе рассматривается постановка задачи и способ построения основных расчетных соотношений для задачи термосилового пространственного деформирования неоднородного стержня. При этом в решении задачи кручения и краевой задачи общего деформирования стержня дополнительно использованы ограничения симметрии расчетной схемы относительно продольных координатных плоскостей.

Материалы и методы исследования

На рис. 1 в системе координат xuz показан прямой стержень, испытывающий пространственный изгиб в сочетании с растяжением (сжатием), кручением и тепловым стационарным воздействием.

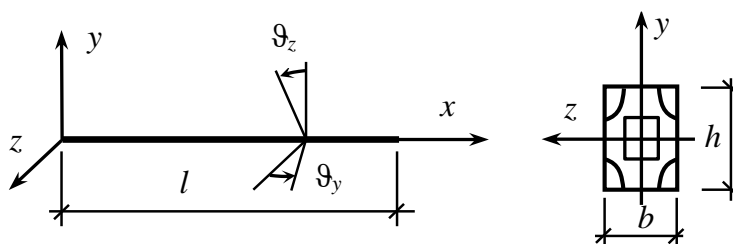


Рис. 1. Расчетная схема стержня
Fig. 1. Schematic view of the rod

Стержень составлен из s квазиоднородных частей (фаз), выполненных из различных конструкционных материалов: металлов, бетона, конструкционных пластмасс, древесины, искусственных дисперсных композитов и т. п. с обеспечением идеального межфазного контакта при отсутствии разрывов в деформациях на границах фаз. Материал k -й фазы характеризуется стационарными в рассматриваемом диапазоне температур физическими характеристиками: модулями упругости E_k , G_k , коэффициентами температурного расширения α_k . На основе решения задачи стационарной теплопроводности в неоднородной структуре выявлено поле температур $t_k(x, y, z)$ ($k = 1, \dots, s$). Стержень имеет призматическую форму, прямоугольное поперечное сечение и симметричную относительно плоскостей xu , xz структуру.

Считая стержень тонким, примем при описании его деформированного состояния гипотезы Тимошенко с дополнительным учетом деформации сечений при кручении. Построение основных соотношений рассмотрим отдельно для случаев пространственного изгиба, поперечного сдвига и кручения.

1. Пространственный термосиловой изгиб с растяжением (сжатием).

Функции перемещений u , v , w в направлении осей x , y , z , деформаций ε и сдвигов γ примем согласно выражениям:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0 - \theta_z y + \theta_y z, & v(x, y, z) &= v_0, & w(x, y, z) &= w_0, \\ \varepsilon_x(x, y, z) &= \varepsilon_0 - \kappa_z y + \kappa_y z, & \varepsilon_y(x, y, z) &= \varepsilon_z(x, y, z) = 0, \\ \kappa_y(x) &= \frac{d\theta_y}{dx}, & \kappa_z(x) &= \frac{d\theta_z}{dx}, \\ \gamma_{xy}(x, y, z) &= \frac{dv_0}{dx} - \theta_z = \gamma_{y0}(x), \\ \gamma_{xz}(x, y, z) &= \frac{dw_0}{dx} + \theta_y = \gamma_{z0}(x), & \gamma_{yz} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_0(x)$, $v_0(x)$, $w_0(x)$ – перемещения точек геометрической оси; $\theta_y(x)$, $\theta_z(x)$ – углы поворота сечений относительно осей y , z .

Интегральные силовые факторы в сечении s -фазного стержня заданы формулой

$$[N, M_z, M_y](x) = \sum_{k=1}^s \iint_{A_k} [\sigma_x^{(k)}, -y\sigma_x^{(k)}, z\sigma_x^{(k)}] dA, \quad (2)$$

где A_k – площадь k -й фазы в нормальном сечении.

Подставив в (2) выражение закона Дюамеля – Нэймана

$$\sigma_x^{(k)} = E_k [\varepsilon_x - \alpha_k t_k], \quad (3)$$

при учете (1) для деформации ε_x , получим физические соотношения, связывающие интегральные силовые факторы с обобщенными деформациями при термоупругом изгибе с растяжением

$$\begin{cases} D_0 \varepsilon_0 - D_z \kappa_z + D_y \kappa_y = N - N_t, \\ -D_z \varepsilon_0 + D_{zz} \kappa_z - D_{yz} \kappa_y = M_z - M_{zt}, \\ D_y \varepsilon_0 - D_{yz} \kappa_z + D_{yy} \kappa_y = M_y - M_{yt}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь интегральные температурные силовые факторы

$$N_t = -\sum_{k=1}^s E_k \alpha_k \iint_{A_k} t_k dA, \quad M_{zt} = \sum_{k=1}^s E_k \alpha_k \iint_{A_k} t_k y dA, \quad M_{yt} = -\sum_{k=1}^s E_k \alpha_k \iint_{A_k} t_k z dA \quad (5)$$

представляют собой усилия в неоднородном сечении, возникающие при наличии температурного поля $t(y, z)$ и отсутствии деформаций ($\varepsilon_0 = \kappa_z = \kappa_y = 0$).

Коэффициенты при обобщенных деформациях в (4) образуют матрицу жесткости с компонентами

$$D_0 = \sum_{k=1}^s E_k \iint_{A_k} dA, \quad [D_z, D_y] = \sum_{k=1}^s E_k \iint_{A_k} [y, z] dA, \quad (6)$$

$$[D_{zz}, D_{zy}, D_{yy}] = \sum_{k=1}^s E_k \iint_{A_k} [y^2, yz, z^2] dA$$

нулевого (D_0), первого (D_z, D_y) и второго (D_{zz}, D_{zy}, D_{yy}) геометрических порядков. В работе [13] жесткости D_z, D_y названы жесткостями взаимного влияния: а) осевой деформации ε_0 на изгибающие моменты и б) кривизн κ_z, κ_y на продольную силу.

Разделив в системе (4) первое уравнение на D_0 , второе на D_{zz} , а третье на D_{yy} , получим

$$\begin{cases} \varepsilon_0 - y_0 \kappa_z + z_0 \kappa_y = \frac{N - N_t}{D_0}, \\ -\frac{y_0}{i_z^2} \varepsilon_0 + \kappa_z - \frac{i_{yz}^2}{i_z^2} \kappa_y = \frac{M_z - M_{zt}}{D_{zz}}, \\ \frac{z_0}{i_y^2} \varepsilon_0 - \frac{i_{yz}^2}{i_y^2} \kappa_z + \kappa_y = \frac{M_y - M_{yt}}{D_{yy}}, \end{cases} \quad (7)$$

$$y_0 = \frac{D_z}{D_0}, \quad z_0 = \frac{D_y}{D_0}, \quad i_z = \sqrt{\frac{D_{zz}}{D_0}}, \quad i_y = \sqrt{\frac{D_{yy}}{D_0}}, \quad i_{yz} = \sqrt{\frac{D_{zy}}{D_0}}. \quad (8)$$

Выражения (8) определяют жесткостные параметры неоднородного сечения: y_0, z_0 – координаты центра жесткости сечения; осевые i_z, i_y и центробежный i_{yz} – радиусы жесткости сечения.

Нормальные напряжения (3) с использованием (1), (7) для неоднородного сечения общего вида представим в форме

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(k)} = \frac{E_k}{D} & \left\{ \frac{N - N_t}{D_0} \left[1 - \frac{i_{yz}^4}{i_z^2 i_y^2} + \left(\frac{i_{yz}^2}{i_y^2} z_0 - y_0 \right) \frac{y}{i_z^2} + \left(\frac{i_{yz}^2}{i_z^2} y_0 - z_0 \right) \frac{z}{i_y^2} \right] - \right. \\ & - \frac{M_z - M_{zt}}{D_{zz}} \left[\frac{i_{yz}^2}{i_y^2} z_0 - y_0 + \left(1 - \frac{z_0^2}{i_y^2} \right) y + \left(y_0 z_0 - i_{yz}^2 \right) \frac{z}{i_y^2} \right] + \\ & + \frac{M_y - M_{yt}}{D_{yy}} \left[\frac{i_{yz}^2}{i_z^2} y_0 - z_0 + \left(y_0 z_0 - i_{yz}^2 \right) \frac{y}{i_z^2} + \left(1 - \frac{y_0^2}{i_z^2} \right) z \right] \Bigg\} - E_k \alpha_k t_k, \quad (9) \\ D = & 1 - \frac{i_{yz}^4}{i_y^2 i_z^2} + \left(\frac{i_{yz}^2}{i_y^2} z_0 - y_0 \right) \frac{y_0}{i_z^2} + \left(\frac{i_{yz}^2}{i_z^2} y_0 - z_0 \right) \frac{z_0}{i_y^2}. \end{aligned}$$

В случае симметричного сечения, принятого в настоящей статье, либо при выполнении перехода к главным центральным осям жесткости, обеспечивающим для жесткостей взаимного влияния выполнение условий $D_y = D_z = D_{yz} = 0$, а значит, согласно (8), $y_0 = z_0 = i_{yz} = 0$, $D = 1$, матрица жесткости системы (4) принимает диагональный вид, система (7) распадается на три независимых уравнения, что позволяет впоследствии решать краевые задачи для двух плоских изгибов и растяжения отдельно. В этом случае нормальные напряжения (9), действующие в k -й фазе при силовом и тепловом воздействиях, могут быть найдены по формуле

$$\sigma_x^{(k)} = E_k \left(\frac{N - N_t}{D_0} - \frac{M_z - M_{zt}}{D_{zz}} y + \frac{M_y - M_{yt}}{D_{yy}} z - \alpha_k t_k \right), \quad (10)$$

что согласуется с формулами, полученными в [6].

Примечательным является факт инвариантности значения определителя матрицы жесткости при параллельном переносе осей y, z системы координат. При использовании системы (4) и (7) соответственно имеем

$$\det \begin{vmatrix} D_0 & -D_z & D_y \\ -D_z & D_{zz} & -D_{yz} \\ D_y & -D_{yz} & D_{yy} \end{vmatrix} = D_0 D_{yy} D_{zz}, \quad \det \begin{vmatrix} 1 & -y_0 & z_0 \\ -\frac{y_0}{i_z^2} & 1 & -\frac{i_{yz}^2}{i_z^2} \\ \frac{z_0}{i_y^2} & -\frac{i_{yz}^2}{i_z^2} & 1 \end{vmatrix} = 1.$$

2. Пространственный поперечный сдвиг. Примем для стержня Тимошенко аппроксимации сдвигов в виде

$$\begin{aligned} \gamma_{xy}(x, y, z) &= a_y(x) f_y(y), \\ \gamma_{xz}(x, y, z) &= a_z(x) f_z(z) \end{aligned} \quad (10)$$

с амплитудами a_y, a_z и заданными функциями распределения f_y, f_z , удовлетворяющими граничным условиям на поверхностях

$$f_y(y) = 0, \quad y = \pm h/2,$$

$$f_z(z) = 0, \quad z = \pm b/2.$$

Схожая аппроксимация применена для пластин в [2]. Используя закон Гука и условия равновесия

$$[Q_y, Q_z](x) = \sum_{k=1}^s \iint_{A_k} [\tau_{yx}^{(k)}, \tau_{zx}^{(k)}] dA, \quad (11)$$

получим формулы для касательных напряжений в k -й фазе

$$\tau_{xy}^{(k)}(z, y, z) = \frac{Q_y G_k f_y(y)}{\sum_{j=1}^s G_j \iint_{A_j} f_y dA}, \quad \tau_{xz}^{(k)}(z, y, z) = \frac{Q_z G_k f_z(z)}{\sum_{j=1}^s G_j \iint_{A_j} f_z dA}. \quad (12)$$

Учитывая (10), (11), (12), жесткости неоднородного сечения при сдвигах, входящие в физические соотношения

$$D_{Qy}\gamma_{y0} = Q_y, \quad D_{Qz}\gamma_{z0} = Q_z, \quad (13)$$

можно записать в виде

$$D_{Qy} = \frac{1}{k_y} \sum_{k=1}^s G_k \iint_{A_k} f_y dA, \quad D_{Qz} = \frac{1}{k_z} \sum_{k=1}^s G_k \iint_{A_k} f_z dA, \quad (14)$$

$$k_y = \frac{\gamma_{y0}}{a_y}, \quad k_z = \frac{\gamma_{z0}}{a_z}.$$

Параметры k_y, k_z представляют собой коэффициенты осреднения функций деформаций сдвига (10) при введении обобщенных сдвигов γ_{y0}, γ_{z0} в кинематических соотношениях (1). В частности, значению $k_y = 1$ соответствует принятие в качестве γ_{y0} максимального сдвига. При интегральном

осреднении следует положить $k_y = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} f_y dy, \gamma_{y0} = k_y a_y$. Принятие, например, параболической функции $f_y = 1 - (2y/h)^2$ дает значение $k_y = 2/3$.

Для стержней с простой геометрической формой фаз, например слоистых, касательные напряжения τ_{xy}, τ_{xz} могут быть найдены более строго – из условий равновесия сдвигаемых частей сечения:

$$\tau_{yx}^{(k)}(z, y, z) = \frac{Q_y D_z^{\text{sec}}}{D_{zz}} \frac{G_k}{\sum_{j \in j_y} G_j(z) b_j(y)}, \quad \tau_{xz}^{(k)}(z, y, z) = \frac{Q_z D_y^{\text{sec}}}{D_{yy}} \frac{G_k}{\sum_{j \in j_z} G_j(y) h_j(z)},$$

$$D_z^{\text{sec}}(y) = \int_y^{h/2} \int_{-b/2}^{b/2} E(y, z) y dy dz, \quad D_y^{\text{sec}}(z) = \int_z^{b/2} \int_{-h/2}^{h/2} E(y, z) z dy dz.$$

Здесь, по сравнению с формулами, приведенными в [6] для плоской задачи, введены вторые множители, содержащие модули сдвига и отражающие зависимость от второй координаты в сечении. При вычислении напряжений $\tau_{yx}^{(k)}$ суммирование в формуле выполняется по фазам, пересекаемым горизонтальным уровнем y с номерами $j \in j_y$. Аналогично в формуле для $\tau_{xz}^{(k)}$ это осуществляется для фаз, пересекаемых уровнем z с номерами $j \in j_z$.

3. Кручение стержня. Перемещения при кручении получим как результат жесткого поворота сечения и его деформации [20]:

$$u(x, y, z) = \kappa_x \psi(y, z), \quad \kappa_x(x) = \frac{d\theta_x}{dx}, \quad (15)$$

$$v(x, z) = -\theta_x z, \quad w(x, y) = \theta_x y.$$

Здесь θ_x – угол поворота сечения относительно оси x ; κ_x – кручение оси стержня; ψ – функция деформации Сен-Венана. При учете (15) компоненты сдвиговой деформации и касательные напряжения принимают вид

$$\gamma_{xy}(x, y, z) = \kappa_x \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - z \right), \quad \gamma_{xz}(x, y, z) = \kappa_x \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + y \right), \quad \gamma_{yz} = 0,$$

$$\tau_{xy}^{(k)} = G_k \kappa_x \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - z \right), \quad \tau_{xz}^{(k)} = G_k \kappa_x \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + y \right).$$

Далее напряжения при кручении будем определять с помощью функции напряжений Прандтля φ [20]. Взяв за основу выражения напряжений в однородном стержне

$$\tau_{xy} = \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \tau_{xz} = -\frac{\partial \varphi}{\partial y},$$

представим их для неоднородного стержня в виде

$$\tau_{xy}^{(k)} = G_k \kappa_x \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z}, \quad \tau_{xz}^{(k)} = -G_k \kappa_x \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial y}. \quad (16)$$

Здесь $\bar{\varphi}$ – единая для всех фаз сечения аппроксимация функции деформаций при кручении. Примем для нее, согласно мембранной аналогии, функцию прогибов гибкой мембраны w , закрепленной на контуре сечения ($w \rightarrow \bar{\varphi}$). Аппроксимируем прогибы мембраны выражением

$$\bar{\varphi} = bh[\operatorname{ch}(\alpha_{0z}) - \operatorname{ch}(\alpha_{0z}\xi_z)][\operatorname{ch}(\alpha_{0y}) - \operatorname{ch}(\alpha_{0y}\xi_y)], \quad (17)$$

$$\xi_y = 2y/h, \quad \xi_z = 2z/b,$$

удовлетворяющим требуемому условию $\bar{\varphi} = 0$ на границе $\xi_y = \xi_z = \pm 1$. Заданные масштабные параметры α_{0z} , α_{0y} определяют интервалы гиперболических функций в (17), используемые для аппроксимации на прямоугольной области сечения. В отличие от тригонометрической аппроксимации, форма (17) дает физически правильный знак вторых производных напряжений $\partial^2 \tau_{xz} / \partial z^2$, $\partial^2 \tau_{xy} / \partial y^2$.

Подставив напряжения (16), записанные с учетом функции (17), в условие равновесия для крутящего момента

$$M_t(x) = \sum_{k=1}^s \iint_{A_k} (\tau_{xz}^{(k)} y - \tau_{xy}^{(k)} z) dA,$$

получим формулы для касательных напряжений при кручении

$$\tau_{xz}^{(k)} = \frac{2G_k M_t}{D_t} b \alpha_{0y} \operatorname{sh}(\alpha_{0y} \xi_y) [\operatorname{ch}(\alpha_{0z}) - \operatorname{ch}(\alpha_{0z} \xi_z)],$$

$$\tau_{xy}^{(k)} = -\frac{2G_k M_t}{D_t} h \alpha_{0z} \operatorname{sh}(\alpha_{0z} \xi_z) [\operatorname{ch}(\alpha_{0y}) - \operatorname{ch}(\alpha_{0y} \xi_y)]$$

и жесткость неоднородного сечения при кручении

$$D_t = 2 \sum_{k=1}^s G_k \iint_{A_k} \{ b \alpha_{0y} \operatorname{sh}(\alpha_{0y} \xi_y) [\operatorname{ch}(\alpha_{0z}) - \operatorname{ch}(\alpha_{0z} \xi_z)] y -$$

$$- h \alpha_{0z} \operatorname{sh}(\alpha_{0z} \xi_z) [\operatorname{ch}(\alpha_{0y}) - \operatorname{ch}(\alpha_{0y} \xi_y)] z \} dA, \quad (18)$$

входящей в физическое обобщенное равенство при кручении

$$D_t \kappa_x = M_x. \quad (19)$$

4. Формулировка краевой задачи. Как известно, физическая структура стержня не оказывает влияния на вид формируемых для него условий равновесия и кинематических соотношений. Представим систему дифференциальных уравнений в перемещениях для рассмотренных видов деформирования при учете жесткостных характеристик (6), (14), (18), физических соотношений (13), (19) и записанных с учетом симметрии (4):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left(D_0 \frac{du}{dx} \right) &= q_x - \frac{dN_t}{dx}, \\ \frac{d^2}{dx^2} \left[D_{zz} \left(\frac{d^2 v}{dx^2} - \frac{d\gamma_{y0}}{dx} \right) \right] &= q_y - \frac{d^2 M_{yt}}{dx^2}, \\ \frac{d^2}{dx^2} \left[D_{yy} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{d\gamma_{z0}}{dx} \right) \right] &= q_z - \frac{d^2 M_{zt}}{dx^2}, \\ \frac{d}{dx} \left(D_x \frac{d\theta_x}{dx} \right) &= m_x. \end{aligned}$$

Система дополняется двенадцатью кинематическими и статическими условиями, соответствующими способу закрепления концов стержня. Последние записываются с использованием физических зависимостей (4), (13), (19).

Выводы

Таким образом, полученные соотношения позволяют выполнять приближенные постановки и решения разнообразных краевых прямых и обратных задач, в числе которых: выявление напряженно-деформированного состояния композитного стержня при термосиловом воздействии, оценка его прочности и жесткости, выявление рациональных геометрических и структурных параметров неоднородной структуры стержня, оптимизационные задачи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Миценко А.В. Расчетная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 35–44. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.5
2. Андреев А.Н., Немировский Ю.В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины: изгиб, устойчивость, колебания. Новосибирск : Наука, 2001. 288 с. EDN: RTXGKT
3. Chen W., Hao J., Tang M. Analytical analysis of dynamic stress distribution of fiber reinforced polymer rod based on realistic boundary shear stress // Composites Part B: Engineering. 2017. V. 131. P. 209–220. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.043>
4. Li C., Yin X., Wang Y., Zhang L., Zhang Z., Liu Y., Xian G. Mechanical property evolution and service life prediction of pultruded carbon/glass hybrid rod exposed in harsh oil-well condition // Composite Structures. 2020. V. 246. Art. 112418. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112418>
5. Миценко А.В. Моделирование двумерных температурных полей в структурно-неоднородных стержнях с разрывными геометрическими параметрами // Известия вузов. Строительство. 2018. № 1. С. 5–15. DOI 10.32683/0556-1052-2018-709-1-5-15

6. Мищенко А.В. Напряжения в слоистых стержнях переменного сечения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 13. № 4. С. 537–547. URL: <https://mkmk.ras.ru/volume/2007/%e2%84%964-2007/>
7. Bedon C., Louter C. Numerical investigation on structural glass beams with GFRP-embedded rods, including effects of pre-stress // Composite Structures. 2018. V. 184. P. 650–661. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.027>
8. O'Neill C., McPolin D., Taylor S.E., Martin T., Harte A.M. Glued-in basalt FRP rods under combined axial force and bending moment: An experimental study // Composite Structures. 2018. V. 186. P. 267–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.029>
9. Деревянных Е.А., Миронов Б.Г. К вопросу о кручении неоднородных призматических стержней // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2014. № 3 (21). С. 105–111. URL: <http://limit21.ru/upload/arhiv/21.pdf>
10. Winczek J. A simplified method of predicting stresses in surfaced steel rods // Journal of Materials Processing Technology. 2012. V. 212. I. 5. 2012. P. 1080–1088. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.12.016>
11. Turusov R.A. Elastic and thermal behavior of a layered structure. Part II. Calculation results and their analysis // Mech. Compos Mater. 2015. V. 51. P. 127–134. URL: <https://doi.org/10.1007/s11029-015-9484-9>
12. Andreev V.I., Turusov R.A. Thermal strength of adhesion bond // Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 670–671. P. 153–157. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.153>
13. Горбачев В.И. Инженерная теория сопротивления неоднородных стержней из композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия : Естественные науки. 2016. № 6. С. 56–72. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-6-56-72
14. Горынин Г.Л., Немировский Ю.В. Продольно-поперечный изгиб слоистых балок в трехмерной постановке // ПМТФ. 2004. Т. 45. № 6. С. 133–143. URL: <https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120017>
15. Yankovskii A.P. Refinement of the asymptotic expansions when solving the spatial problem of the bending and twisting of composite bars // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2015. V. 79. № 5. P. 475–492. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.03.009>
16. Azinović B., Danielsson H., Serrano E., Kramar M. Glued-in rods in cross laminated timber – Numerical simulations and parametric studies // Construction and Building Materials. 2019. V. 212. P. 431–441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.331>
17. Jawdhari A., Harik I. Finite element analysis of RC beams strengthened in flexure with CFRP rod panels // Construction and Building Materials. 2018. V. 163. P. 751–766. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.139>
18. Grunwald C., Kaufmann M., Alter B., Vallée T., Tannert T. Numerical investigations and capacity prediction of G-FRP rods glued into timber // Composite Structures. 2018. V. 202. P. 47–59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.010>
19. Wu Q., Xiao S., Iwashita K. Experimental study on the interfacial shear stress of RC beams strengthened with prestressed BFRP rod // Results in Physics. 2018. V. 10. P. 427–433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.06.007>
20. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of Elasticity. 3 edition. New York : McGraw-Hill College, 1970. 608 p. ISBN-13: 978-0070647206, ISBN-10: 0070647208.

REFERENCES

1. Mishchenko A.V. Calculation model of nonlinear dynamic deformation of composite multi-phase rods. *Vestnik MGSU*. 2014; (5): 35–44. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.5 (In Russian)
2. Andreev A.N., Nemirovsky Yu.V. Multilayer anisotropic shells and plates: Bending, stability, vibrations. Novosibirsk: Nauka, 2001. 288 p. EDN: RTXGKT (In Russian)
3. Chen W., Hao J., Tang M. Analytical analysis of dynamic stress distribution of fiber reinforced polymer rod based on realistic boundary shear stress. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 131: 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.043>

4. Li C., Yin X., Wang Y., Zhang L., Zhang Z., Liu Y., Xian G. Mechanical property evolution and service life prediction of pultruded carbon/glass hybrid rod exposed in harsh oil-well condition. *Composite Structures*. 2020; 246: 112418. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112418>
5. Mishchenko A.V. Modeling of two-dimensional temperature fields in rods with structural inhomogeneity and discontinuous geometrical parameters. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2018; (1): 5–15. DOI 10.32683/0556-1052-2018-709-1-5-15 (In Russian)
6. Mishchenko A.V. Stresses in layered rods with variable cross section. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktiv. 2007; 13(4): 537-547. (In Russian)*
7. Bedon C., Louter C. Numerical investigation on structural glass beams with GFRP-embedded rods, including effects of pre-stress. *Composite Structures*. 2018; 184: 650–661. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.10.027>
8. O'Neill C., McPolin D., Taylor S.E., Martin T., Harte A.M. Glued-in basalt FRP rods under combined axial force and bending moment: An experimental study. *Composite Structures*. 2018; 186: 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.12.029>
9. Derevyannykh E.A., Mironov B.G. Torsion of heterogeneous prismatic rods. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2014; 3 (21): 105–111. (In Russian)
10. Winczek J.A. Simplified method of predicting stresses in surfaced steel rods. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012; 212 (5): 1080–1088. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.12.016>
11. Turusov R.A. Elastic and thermal behavior of a layered structure. Part II. Calculation results and their analysis. *Mechanics of Composite Materials*. 2015; 51: 127–134 <https://doi.org/10.1007/s11029-015-9484-9>
12. Andreev V.I., Turusov R.A. Thermal strength of adhesion bond. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 670-671: 153–157 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.153>
13. Gorbachev V.I. Engineering theory of inhomogeneous rods resistance from composite materials. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya: Estestvennye nauki*. 2016; (6): 56–72. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-6-56-72 2016 (In Russian)
14. Gorynin G.L., Nemirovsky Yu.V. Longitudinal-transverse bending of laminated beams in three-dimensional setting. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2004; 45 (6): 133–143. (In Russian)
15. Yankovskii A.P. Refinement of the asymptotic expansions, solving the spatial problem of the bending and twisting of composite bars. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2015; 79 (5): 475–492 <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.03.009>
16. Azinović B., Danielsson H., Serrano E., Kramar M. Glued-in rods in cross laminated timber - Numerical simulations and parametric studies. *Construction and Building Materials*. 2019; 212: 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.331>
17. Jawdhari A., Harik I. Finite element analysis of RC beams strengthened in flexure with CFRP rod panels. *Construction and Building Materials*. 2018; 163: 751–766 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.139>
18. Grunwald C., Kaufmann M., Alter B., Vallée T., Tannert T. Numerical investigations and capacity prediction of G-FRP rods glued into timber. *Composite Structures*. 2018; 202: 47–59 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.10.010>
19. Wu Q., Xiao S., Iwashita K. Experimental study on the interfacial shear stress of RC beams strengthened with pre-stressed BFRP rod. *Results in Physics*. 2018; 10: 427–433 <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.06.007>
20. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill College, 1970. 608 p. ISBN-13: 978-0070647206, ISBN-10: 0070647208.

Сведения об авторе

Мищенко Андрей Викторович, докт. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113; Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище, 630117, Новосибирск, ул. Иванова, 49, mavr59@ngs.ru

Author details

Andrey V. Mishchenko, DSc, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia; Order of Zhukov Novosibirsk Higher Military Command School, 49, Ivanov Str., 630117, Novosibirsk, Russia, mavr59@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 21.09.2023
Одобрена после рецензирования 03.10.2023
Принята к публикации 21.11.2023

Submitted for publication 21.09.2023
Approved after review 03.10.2023
Accepted for publication 21.11.2023

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 125–138.

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 (6): 125–138.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-125-138

EDN: ZUZWRN

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЮМИНАТНЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЛИНОЗЕМИСТОГО ЦЕМЕНТА

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. Глиноземистый цемент представляет собой быстротвердеющее гидравлическое вяжущее вещество с содержанием в готовом продукте низкоосновных алюминатов кальция. Производство глиноземистого цемента способом плавления получило более широкое распространение. Плавление шихты, состоящей из бокситов и известняков, осуществляется при температуре 1500–1600 °С, что влечёт за собой колоссальный расход энергоресурса и, соответственно, рост себестоимости получаемого продукта. В настоящей статье приведены исследования возможности снижения температуры плавления, а также расходов на основной дорогостоящий компонент смеси – боксид – путём замены его алюмосодержащими отходами.

Актуальность. Ввиду высокой стоимости бокситов экономически более целесообразно взамен их использовать алюминиосодержащие отходы различных производств.

Цель исследования – выявить, как изменяется вещественный состав двухкомпонентных сырьевых смесей для получения глиноземистого клинкера в зависимости от содержания Al_2O_3 в исходных алюминатных отходах. Определить оптимальную температуру обжига глиноземистого клинкера на алюминиосодержащих отходах. Изучить прочностные характеристики полученного глиноземистого цемента, а также влияние ввода известняка на основной показатель качества.

Методы. Для определения химического состава исследуемых алюминатных отходов (шлам и порошок), приготовленных сырьевых смесей на их основе и полученных клинкеров в лабораторных условиях были использованы спектрофотометрические методы анализа и пламенной фотометрии согласно ГОСТ 5382–2019. Рентгенофазовый анализ отходов и клинкера определялся методом порошковой дифракции на дифрактометре ARL X'TRA. Физико-механические испытания полученных клинкеров проводились согласно ГОСТ 30744–2001 с использованием полифракционного песка.

Результаты. Лабораторные исследования показали, что алюминатные отходы (шлам и порошок), состоящие из алюмосодержащих минералов гиббсита и бемита, пригодны в сочетании с известняком для получения глиноземистого клинкера. В зависимости от исходного содержания Al_2O_3 доля их в сырьевой смеси может колебаться от 60 до 75 %.

Выводы. Оптимальной температурой обжига глиноземистого клинкера в зависимости от состава является 1350–1400 °С, минералогический состав клинкеров состоит на 85–90 % из алюминатов кальция. Прочность глиноземистых цементов, определенная в малых образцах в тесте нормальной густоты состава 1:0, показала в возрасте 2 сут высокую прочность, равную 33,7–40,6 МПа. Введение в цемент в качестве добавки-наполнителя 5 % кристаллического известняка ускоряет начальную скорость твердения и позволяет за счет дополнительного образования $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ повысить прочность в 2 сут с 33,7 до 53,2 МПа.

Ключевые слова: алюмосодержащие отходы, геленит, гиббсит, моноалюминат кальция, гидрокарбоалюминат кальция, низкоосновные алюминаты кальция, рентгенограмма

Для цитирования: Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Исследование возможности использования алюминатных отходов алюминиевых сплавов для получения глиноземистого цемента // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 125–138. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-125-138. EDN: ZUZWRN

ORIGINAL ARTICLE

ALUMINUM WASTE IN ALUMINA CEMENT PRODUCTION

Aleksandr A. Krutinin¹, Tatiana V. Krapchetova²,
Nadezhda A. Inkova¹, Olesya K. Pakhomova¹

¹Sebyakovsk branch of Volgograd State Technical University,
Mikhailovka, Russia

²AO "Sebyakovtsement", Mikhailovka, Russia

Abstract. Alumina cement is a rapidly hardening hydraulic binder containing low-basic calcium aluminates in the final product. The alumina cement production by melting is widespread. Melting of the mixture consisting of bauxite and limestone is carried out in the temperature range of 1500 to 1600 °C, which entails enormous energy consumption and, accordingly, the higher cost of resulting products. The paper studies the possibility of reducing the melting point as well as the cost of the main mixture component bauxite via its replacement by aluminum-containing waste.

Purpose: Suggest the dependence between the mixture composition and the Al_2O_3 content in the initial aluminum waste; determine the best annealing temperature for alumina clinker; study strength properties of the resulting alumina cement and the effect of introduced limestone on the main quality index.

Methodology: The chemical composition of the aluminum waste (sludge and powder), raw mixtures, and resulting clinker are detected in laboratory conditions using spectrophotometry and flame photometry methods in accordance with the state standard. X-ray phase analysis of

waste and clinker is based on the powder diffraction method and conducted on the Thermo Scientific ARL X'TRA Powder Diffractometer. Physical and mechanical tests are carried out in accordance with the state standard poly-fraction sand.

Research findings: Laboratory studies show that aluminum waste (sludge and powder), consisting of gibbsite and boehmite in combination with limestone, is suitable for the production of alumina clinker. Depending on the initial Al_2O_3 content, their content in the raw mixture ranges from 60 to 75 %.

Value: Depending on the composition, the best annealing temperature for alumina clinker, is 1350 to 1400 °C; the mineralogical composition of clinkers consists of 85–90 % calcium aluminates. Alumina cement strength determined in small test samples having normal density and the ratio 1:0, is high after 2 days and ranges from 33.7 to 40.6 MPa. The addition of 5 % crystalline limestone into cement accelerates the initial rate of hardening and improves the strength from 33.7 to 53.2 MPa after 2 days due to the additional formation of $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$.

Keywords: aluminum-containing waste, helenite, gibbsite, calcium monoaluminate, hydrated calcium carboaluminate, low-base calcium aluminates, XRD pattern

For citation: Krutinin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K. Aluminum waste in alumina cement production. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 125–138. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-125-138. EDN: ZUZWRN

Введение

Глиноземистый цемент представляет собой быстротвердеющее гидравлическое вяжущее вещество, являющееся продуктом тонкого измельчения обожженной до плавления или спекания сырьевой смеси, состоящей из бокситов и известняков и рассчитанной на преобладание в готовом продукте низкоосновных алюминатов кальция [1].

Название цемента, прежде всего, обусловлено содержанием в нем Al_2O_3 . При содержании в цементе Al_2O_3 до 60 % – глиноземистый цемент, свыше этого количества – высокоглиноземистый цемент. Соотношение $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ может характеризовать фазовый состав цемента. При мольном соотношении $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$ цемент относится к моноалюминатному типу, а при соотношении 1:2 – к диалюминатному. К типу 1 относятся цементы, содержащие $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_{12}A_7) и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CA), к типу 2 – содержащие $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CA})$ и $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3(\text{CA}_2)$ [2].

Химический состав глиноземистого цемента характеризует его свойства.

Оксид кремния в количестве 4–5 % способствует более равномерному плавлению шихты, что ускоряет завершение процессов минералообразования. Однако увеличение содержания SiO_2 отрицательно влияет на качество цемента вследствие образования медленно гидратирующихся низкоосновных силикатов кальция CS и геленита C_2AS . Верхняя граница содержания SiO_2 может быть около 15 %. Продукт, содержащий большее количество SiO_2 , применять как самостоятельное гидравлическое вяжущее не имеет смысла, поскольку этот цемент теряет начальную прочность. Отношение $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ является важнейшей характеристикой состава глиноземистого цемента. При $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2 < 2$ качество цемента невысокое.

$12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ присутствует в небольших количествах. Эта фаза редко встречается в глиноземистом цементе в чистом виде. В цементную решетку C_{12}A_7 входят Fe_2O_3 , FeO и MgO . Этот алюминат быстро реагирует с водой,

причем это его свойство играет важную роль в быстром твердении глиноземистых цементов. $C_{12}A_7$ по своей природе является цеолитом и способен поглощать пары воды. Поглощение воды сопровождается изменением параметров решетки, показателя светопреломления $C_{12}A_7$ и изменением характера плавления. В сухом воздухе это соединение плавится инконгруэнтно, разлагаясь при 1374°C на CA и расплав, в присутствии паров воды плавится при 1391°C .

Рентгенографические исследования спеков, полученных обжигом CA_2 с добавками Fe_2O_3 и SiO_2 , показали, что в присутствии SiO_2 образование CA_2 замедляется в связи с образованием геленита C_2AS и Al_2O_3 . C_2AS – бесцветные короткопризматические кристаллы. Присутствие его нежелательно. Структура геленита выполнена полиэдрами $[Si_2O_7]^{6-}$, $[Al_2O_3]^{5-}$ и $[CaO_8]^{10-}$. Координация в решетке весьма симметричная, вследствие чего минерал отличается невысокой гидратационной активностью.

$2CaO \cdot Fe_2O_3$, имея слабо выраженные вяжущие свойства, снижает технические ценности глиноземистого цемента.

$MgO \cdot Al_2O_3$ – инертный, негидратирующийся материал, носящий название магнезиальной шпинели.

В качестве основного сырья для изготовления глиноземистого цемента используют бокситы и известняки. Бокситами называются природные минералы, состоящие из гидратов глинозема с примесью каолинита, кварца, опала и некоторых других минералов. В известняке не должно быть более 2 % MgO и SiO_2 .

Получают глиноземистый цемент двумя способами: плавлением или спеканием соответствующих сырьевых смесей. Выбор способа зависит от химического состава компонентов. При использовании смеси с повышенным содержанием Fe_2O_3 не может быть применен метод спекания вследствие близости температур спекания и плавления шихты. Производство глиноземистого цемента способом плавления получило более широкое распространение, при этом исключается необходимость в очень тонком измельчении сырьевых компонентов. Плавление шихты осуществляется при температуре $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$ в электродуговых печах, конверторах и вращающихся печах, при этом оксид железа восстанавливается.

Производство глиноземистого цемента способом спекания заключается в обжиге тонко измельченной смеси при температуре $1150\text{--}1250^\circ\text{C}$. Осуществляется спекание в камерных туннельных, шахтных и вращающихся печах.

Актуальность темы обусловлена высокой стоимостью бокситов и желательного использования взамен их алюминиосодержащих отходов различных производств [3, 4, 5, 6].

Цель настоящего исследования – определение изменения вещественного состава двухкомпонентных сырьевых смесей для получения глиноземистого клинкера в зависимости от содержания Al_2O_3 в исходных алюминатных отходах; определение оптимальной температуры обжига глиноземистого клинкера на алюминиосодержащих отходах; изучение прочностных характеристик полученного глиноземистого цемента, а также влияния ввода известняка на основной показатель качества.

Задачи:

– Приготовить сырьевые смеси на основе алюминатных отходов (шлам и порошок) и их смесей.

- Определить химический состав смесей, используя спектральные методы анализа, предусмотренные ГОСТ 5382–2019.
- Определить минералогический состав методом порошковой дифракции.
- Определить прочностные характеристики полученных цементов, а также влияние добавки известняка на прочность.
- Сравнить полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

Характеристика исходных материалов и состав сырьевых смесей

Алюминатный шлам серого цвета с вкраплениями белого цвета. На воздухе хорошо впитывает влагу, что затрудняет его истирание. Алюминатный отход в виде порошка серого цвета с включениями темных частиц. Остаток на сите с сеткой № 02 составляет 60 %, фракция 200–80 мкм ~ 25 %, фракция менее 80 мкм ~ 15 %.

В табл. 1 приведен химический состав алюминатных отходов и известняка.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

Table 1

Chemical composition of initial materials

Материал	Содержание, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	ппп
Алюминатный шлам	4,28	37,4	2,05	9,77	1,82	1,02	0,2	0,65	0,21	40,6
Алюминатный порошок	3,07	60,1	3,08	1,07	6,75	6,65	1,56	2,12	3,8	9,8
Известняк	1,73	0,32	0,18	52,81	0,58	0,12	0,05	0,03	0	42,5

Алюминатный шлам содержит 37,4 % Al₂O₃ в виде гиббсита – α -Al₂O₃ · 3H₂O (линии на рис. 1, 2: 4,82; 4,34; 2,49; 2,38; 1,99 Å) и 9,77 % CaO в виде CaCO₃ (линии на рис. 1, 2: 3,86; 3,03; 2,49; 2,29; 2,09; 1,91; 1,86; 1,61 Å). Алюминатный порошок содержит значительно больше Al₂O₃ – до 60,1 % в виде бемита AlO(OH) (линии на рис. 1, 2: 6,23; 2,34; 1,99; 1,86; 1,64 Å) и гиббсита (линии на рис. 1, 2: 4,82; 4,34; 2,45; 2,38; 1,99 Å), кроме того, присутствует сильвин – KCl (линии на рис. 1, 2: 3,18; 2,22 Å), гипс CaSO₄ · 2H₂O (линии на рис. 1, 2: 7,63; 4,34; 3,83; 3,05; 2,85; 2,56 Å).

Ввиду того, что в отвалах оба алюминатных отхода смешаны, исследовалась также смешанная проба состава шлам:порошок – 1:1.

Для синтеза глиноземистого цемента в лабораторных условиях были использованы следующие материалы: алюминатные отходы (шлам, порошок), их смесь в сочетании 1:1 и известняк Жирновского месторождения.

При спекании клинкера все нелетучие соединения, входящие в состав сырьевых компонентов, переходят в состав цемента, поэтому к сырью предъявляются повышенные требования по содержанию оксидов железа и кремния. В известняке ограничивается содержание SiO₂ до 1,8 %, MgO – до 2 %. Как показывают результаты, известняк и алюминатные отходы (шлам и порошок) отвечают необходимым требованиям.

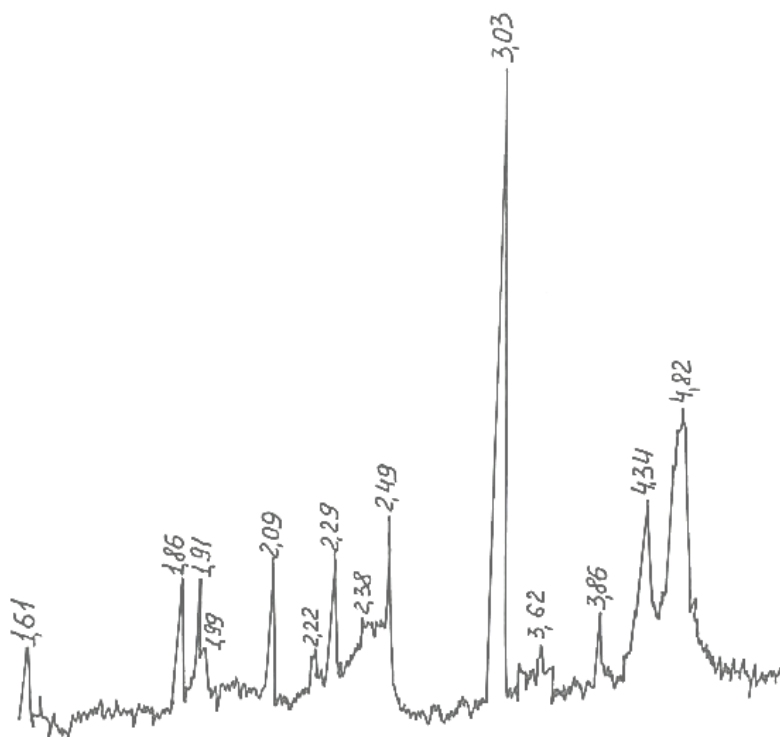


Рис. 1. Рентгенограмма алюминатных отходов шлама

Fig. 1. XRD patterns of sludge

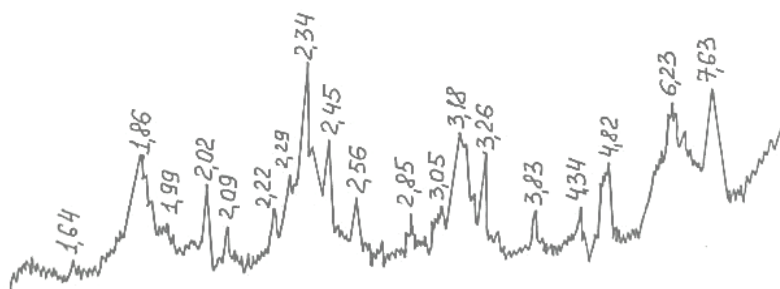


Рис. 2. Рентгенограмма алюминатных отходов порошка

Fig. 2. XRD patterns of aluminate powder

Расчет сырьевой смеси для получения глиноземистого цемента выполняется по формуле Т. Паркера с учетом кривых на диаграмме состояния $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{MgO}$, ограничивающих поля минералов: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{CA})$, $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_{12}\text{A}_7)$, $6\text{CaO} \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_6\text{A}_4\text{FS})$, $6\text{CaO} \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_6\text{A}_4\text{MS})$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{S})$, $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{AS})$ и $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{C}_4\text{AF})$:

$$\frac{\text{Известняк}}{\text{Боксит}} = \frac{(1,857\text{SiO}_2 + 0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO})_{\text{боксит}}}{\text{CaO}_{\text{изв}} - (1,857\text{SiO}_2_{\text{изв}} + 0,55\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{изв}} + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{изв}})}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Компонентный состав сырьевых смесей, %

Table 2

Raw mixture composition, %

Состав	Известняк	Шлам	Порошок	Смесь 1:1
№ 1	25	75	–	–
№ 2	40	–	60	–
№ 3	33	–	–	67

Как видно, в двухкомпонентных сырьевых смесях для получения глиноземистого клинкера в зависимости от содержания Al_2O_3 в исходных алюминатных отходах изменяется доля в смеси от 60 до 75 %.

Таблица 3

Химический состав сырьевых смесей и клинкеров, %

Table 3

Chemical composition of raw mixtures and clinker, %

Со- став	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	ппп	Проч- ность
Сырьевая смесь											
№ 1	3,64	28,13	1,58	20,53	1,50	0,79	0,16	0,49	0,16	41,07	1,92
№ 2	2,53	36,19	1,92	21,76	4,28	4,04	0,96	1,28	2,28	22,88	1,87
№ 3	3,03	32,76	1,78	21,06	3,06	2,61	0,61	0,93	1,34	30,9	1,22
Клинкер											
№ 1	6,14	47,26	2,66	35,27	2,54	1,33	0,28	0,83	0,26	0	3,25
№ 2	3,24	40,18	2,17	37,45	4,89	4,50	1,07	1,43	2,53	0	3,16
№ 3	4,29	43,84	2,4	35,16	4,16	3,5	0,82	1,25	1,79	0	1,85

Как показали расчеты, содержание Al_2O_3 в сырьевых смесях изменяется от 28,13 (смесь № 1) до 36,19 % (смесь № 2), и по этому параметру сырьевые смеси относятся к оптимальным, что должно обеспечить образование в основном моноалюмината кальция. Содержание в смесях CaO изменяется от 20,53 до 21,76 %, т. е. сырьевые смеси относятся к малоизвестковым, SiO_2 в сырьевых смесях содержится в оптимальном количестве, а Fe_2O_3 – несколько меньше оптимального количества.

Следует отметить, что сырьевые смеси содержат повышенное количество оксидов щелочей и хлора, а также прочих оксидов. Желательно выполнить специальное определение редко встречающихся оксидов – фосфора, хрома, титана, марганца и др.

Таким образом, сырьевые смеси по содержанию основных оксидов (Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3) являются оптимальными для получения глиноземистого клинкера.

Определение оптимальной температуры обжига глиноземистого клинкера

Клинкер для глиноземистого цемента чаще получают спеканием, обычно при температуре 1200–1250 °С, однако в нашем случае в связи с составом отходов оптимальная температура обжига была определена опытным путем по усвоению СаО (табл. 4).

Таблица 4

Содержание СаО_{св} в спеках, %

Table 4

CaO content in sintered mass, %

Смесь	Температура обжига, °С				
	1200	1250	1300	1350	1400
№ 1	1,1	0,8	0,4	0	0
№ 2	3,1	2,8	2,2	1,7	0

Спеки при температуре 1250 °С очень хрупкие, рассыпались, светло-серого цвета. При 1300 °С спеки смеси № 1 имели светло-зеленый оттенок, при 1350 °С – спеченный спек темно-зеленого цвета, спеки смесей № 2 и 3 при 1350 °С спеклись частично. При 1400 °С спек смеси № 1 расплавился, спеки смесей № 2 и 3 хорошо спеченные. Таким образом, оптимальной температурой обжига следует считать 1350 °С для смеси № 1 и 1400 °С – для смесей № 2 и 3.

После обжига определили фазовый состав глиноземистых клинкеров (рис. 3–5).

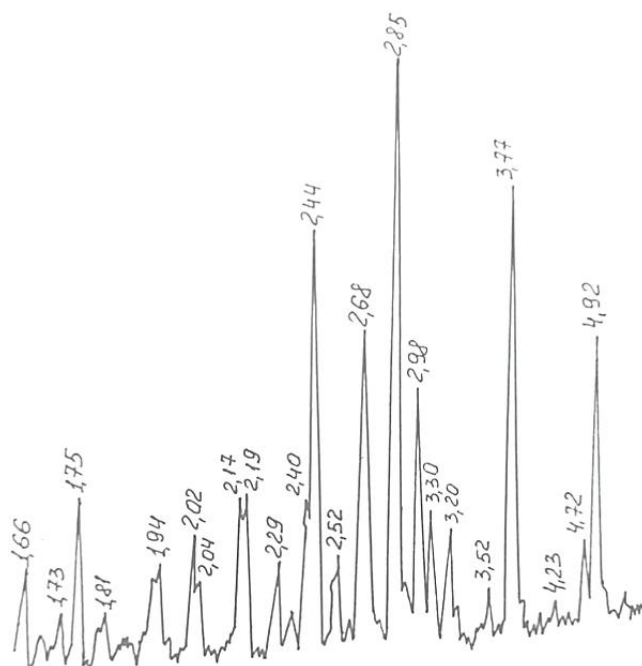


Рис. 3. Рентгенограмма глиноземистого клинкера состава № 1
Fig. 3. XRD pattern of alumina clinker composition 1

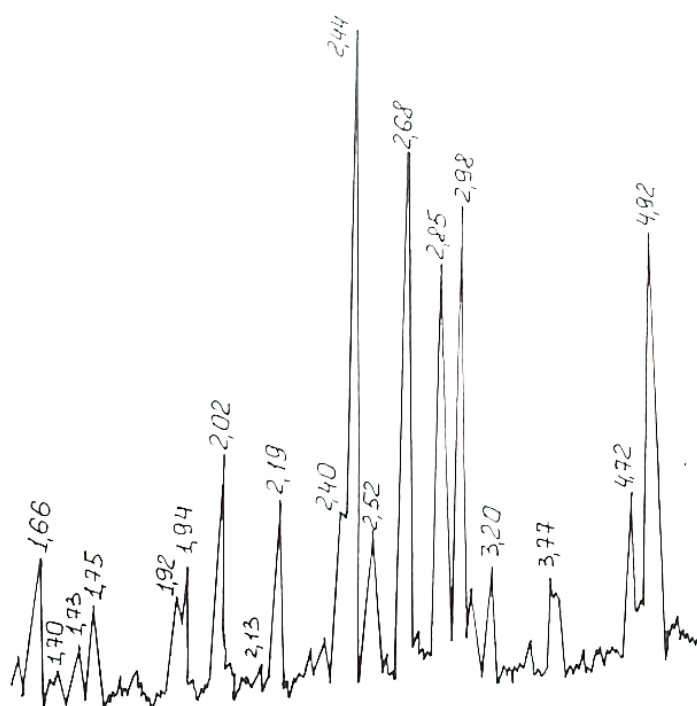


Рис. 4. Рентгенограмма глиноземистого клинкера состава № 2
Fig. 4. XRD pattern of alumina clinker composition 2

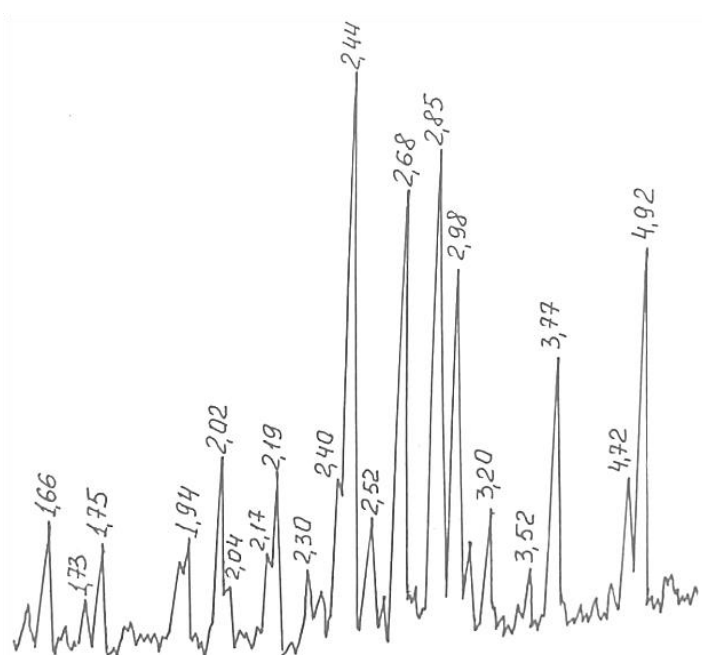


Рис. 5. Рентгенограмма глиноземистого клинкера состава № 3
Fig. 5. XRD pattern of alumina clinker composition 3

Основным минералом в количестве 65–70 % является моноалюминат кальция $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (линии 4,72; 3,77; 2,98; 2,52; 2,44; 2,29; 2,02; 1,94; 1,92; 1,81 Å), около 15–20 % $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (линии 4,92; 2,68; 2,44; 2,17 Å) и 5–10 % геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (линии 4,23; 3,77; 2,85; 2,52; 2,44; 2,40; 2,29; 2,19; 2,04; 1,92; 1,81; 1,75; 1,73; 1,66 Å). В клинкере № 1 содержание геленита максимальное ввиду повышенного количества SiO_2 в сырьевой смеси [7].

Прочностные свойства глиноземистого цемента

Глиноземистый клинкер обладает повышенной твердостью по сравнению с рядовым клинкером, по требованиям государственных стандартов тонкость помола глиноземистого цемента должна характеризоваться максимально доступным остатком на сите № 008, равным 10 %. Ввиду особенностей минералогического состава глиноземистого клинкера, содержащего низкоосновные алюминаты кальция, дающие при гидратации гидроалюминаты с повышенным количеством воды ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), для получения теста нормальной густоты необходимо несколько большее количество воды затворения, нежели для рядового портландцемента [8, 9].

Отличительным свойством глиноземистого цемента является быстрое нарастание прочности при его твердении. Уже через 10–15 ч прочность изделий из глиноземистого цемента составляет 15–20 МПа и оказывается достаточной для введения их в эксплуатацию [10]. Марка глиноземистого цемента соответствует минимальному пределу прочности при сжатии образцов состава № 3 жесткой консистенции через 3 сут твердения. Ввиду малого количества цемента, полученного в лабораторной печи, прочность его определялась в малых образцах – кубках с площадью грани 2 см в тесте нормальной густоты состава 1:0 (табл. 5), поэтому полученные результаты отличаются от показателей стандартов.

Таблица 5

Прочность глиноземистого цемента, МПа

Table 5

Strength of alumina cement, MPa

Цемент	Прочность при сжатии, сут		
	1	2	3
№ 1	32,5	37,0	59,7
№ 2	27,2	33,7	66,1
№ 3	27,3	40,6	60,4

Как видно из данных таблицы, все клинкеры показали высокую начальную прочность, в возрасте 2 сут прочность составила 33,7–40,6 МПа.

На рентгенограммах гидратированного цемента в возрасте 1 сут четко проявляются отражения гексагональных гидроалюминатов кальция состава $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, в небольшом количестве остаются негидратированные $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$. Геленит $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ является инертным минералом, поэтому его количество не изменяется.

С целью оптимизации скорости твердения были выполнены дополнительные исследования по вводу в состав цемента образца № 2 в качестве добавки-наполнителя кристаллического известняка в количестве 5,15 и 25 % (табл. 6) [11, 12, 13, 14].

Таблица 6

Влияние известняка на прочность глиноземистого цемента № 2, МПа

Table 6

Limestone content vs. strength of alumina cement composition 2, MPa

Количество вводимого известняка, %	Прочность при сжатии, сут		
	1	2	28
5	45,3	53,2	67,7
15	33,8	37,3	43,2
25	30,4	35,5	30,1

Как установлено, введение кристаллического известняка значительно повышает прочность через сутки твердения, увеличивая ее от 27,2 до 30,4–45,3 МПа, через 2 сут твердения прочность цементов с известняком также выше, особенно с 5%-й добавкой. К 28 сут прочность глиноземистого цемента с 5%-й добавкой известняка практически не изменяется, а при введении 15–25 % известняка – значительно снижается. Следует считать оптимальным введение 5 % известняка.

Исследование образцов гидратированного цемента с добавкой известняка показали, что в цементном камне дополнительно образуется гидрокарбоалюминат кальция состава $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, видимо, при 5%-й добавке известняка его образуется оптимальное количество, а при 15–25%-й добавке его образование приводит к нарушению структуры и снижению прочности цементного камня.

Выводы

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Лабораторные исследования показали, что алюминатные отходы (шлам и порошок), состоящие из алюмосодержащих минералов гиббсита и бемита, пригодны в сочетании с известняком для получения глиноземистого клинкера.

В зависимости от исходного содержания Al_2O_3 доля их в сырьевой смеси может колебаться от 60 до 75 %.

2. Оптимальной температурой обжига глиноземистого клинкера в зависимости от состава является 1350–1400 °С, минералогический состав клинкеров состоит на 85–90 % из алюминатов кальция. Прочность глиноземистых цементов, определенная в малых образцах в тесте нормальной густоты состава 1:0, показала в возрасте 2 сут высокую прочность, равную 33,7–40,6 МПа. Введение в цемент в качестве добавки-наполнителя 5 % кристаллического известняка ускоряет начальную скорость твердения и позволяет за счет дополнительного образования $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ повысить прочность в возрасте 2 сут с 33,7 до 53,2 МПа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Телеупов Р.Ж. Достоинства и недостатки глиноземистого цемента // Роль инноваций в трансформации современной науки. Ч. 2 : сб. статей Международной научно-практической конференции / отв. ред. А.А. Сукиасян. Уфа : АЭТЕРНА, 2016. С. 32–34.
2. Кузнецова Т.В. Глиноземистый цемент // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2008. № 2. С. 8–24.
3. Мартынова А.А., Батракова Г.М., Поник А.Н. Возможность применения алюмосодержащих отходов в качестве сырьевого компонента для изготовления глиноземистого и высокоглиноземистого цемента // Экология промышленного производства. 2019. № 4 (108). С. 2–5.
4. Черняева Ю.А., Огурцова Ю.Н., Колбасин И.С. Особенности свойств и области применения глиноземистых цемента // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. № 10. С. 149–153.
5. Эваис Э.М., Ахмед Й.М.З., Халил Н.М., Амин М.С., Баракат М.А. Использование алюминиевого шлама и алюминиевого шлака (окалины) для изготовления глиноземистого цемента // Огнеупоры и техническая керамика. 2010. № 11–12. С. 61–69.
6. Ястреб В.В. Перспективы использования глиноземистого цемента // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2017. С. 565–569.
7. Гусев Б.В., Кузнецова Т.В., Самченко С.В. Свойства глиноземистых цемента при различных режимах кристаллизации расплава // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии : тезисы докладов. В 5 томах. Екатеринбург : Уральское отделение Российской академии наук, 2016. С. 150.
8. Данилова Н.В. Влияние гидроалюминатной добавки на свойства глиноземистого цемента // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2019. С. 2396–2400.
9. Данилова Н.В., Кривоногов Ю.Р. Свойства глиноземистого цемента при введении в его состав гидроалюминатной добавки // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 4 (214). С. 60–62.
10. Джанкулаев А.А. Глиноземистый цемент, свойства и применение // Вопросы науки и образования. 2021. № 11 (136). С. 18–20.
11. Дроздов О.И. Особенности гидратации глиноземистого цемента и добавки для его модификации // Международный студенческий строительный форум – 2018 (К 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова) : сб. докладов. В 2 томах. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 250–253.
12. Иващенко С.С., Пермигин Н.П., Горшкова И.В., Иващенко С.И. Модифицированный глиноземистый цемент // Тенденции формирования науки нового времени : сб. статей Международной научно-практической конференции. В 4 частях / отв. ред. А.А. Сукиасян. Уфа : Башкирский государственный университет, 2014. С. 120–123.
13. Исаева Т.С. Влияние добавок на свойства глиноземистого цемента : специальность 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Москва, 2008. 17 с.
14. Исаева Т.С. Влияние добавок на свойства глиноземистого цемента : специальность 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Москва, 2008. 167 с.

REFERENCES

1. Teleupov R.Zh. Advantages and disadvantages of alumina cement. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Innovations in Transformation of Modern Science'*. A.A. Sukiasyan, Ed., 2016. Pp. 32–34. (In Russian)
2. Kuznetsova T.V. Alumina cement. *Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2008; (2): 8–24. (In Russian)

3. Martynova A.A., Batrakova G.M., Ponik A.N. Aluminum-containing waste as a raw material for alumina and high-alumina cement production. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2019; 4 (108): 2–5. (In Russian)
4. Chernyaeva Yu.A., Ogurtsova Yu.N., Kolbasin I.S. The properties and scope of alumina cements. *Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2018; (10): 149–153. (In Russian)
5. Evais E.M., Ahmed Y.M.Z., Khalil N.M., Amin M.S., Barakat M.A. Aluminum sludge and slag in alumina cement production. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2010; (11–12): 61–69. (In Russian)
6. Yastreba V.V. Prospects for the use of alumina cement. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists*. Belgorod, 2017. Pp. 565–569. (In Russian)
7. Gusev B.V., Kuznetsova T.V., Samchenko S.V. Properties of alumina cement after melt crystallization in different conditions. In: *Proc. 20th Mendeleev Congr. on General and Applied Chemistry*. 2016. P. 150. (In Russian)
8. Danilova N.V. Hydrated calcium aluminate additive effect on properties of alumina cement. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists*. Belgorod, 2019. Pp. 2396–2400. (In Russian)
9. Danilova N.V., Krivoborodov Yu.R. Properties of aluminous cement with hydrated calcium aluminate. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019; 33 (4): 60–62. (In Russian)
10. Dzhanikulaev A.A. Aluminous cement, properties and applications. *Voprosy nauki i obrazovaniya*. 2021; 11 (136): 18–20. (In Russian)
11. Drozdov O.I. Hydration of aluminous cement and additives for its modification. In: *Proc. Int. Student Construction Forum*, in 2 vol., Belgorod, 2018. Pp. 250–253. (In Russian)
12. Ivashchenko S.S., Permigin N.P., Gorshkova I.V., Ivashchenko S.I. Modified aluminous cement. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Trends in Modern Science'*, 4 parts. 2014. Pp. 120–123. (In Russian)
13. Isaeva T.S. Additive effect on alumina cement properties. PhD Abstract. Moscow, 2008. (In Russian)
14. Isaeva T.S. Additive effect on alumina cement properties. PhD Thesis, Moscow, 2008. (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, kotyra84@bk.ru

Крапчетова 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

Aleksandr A. Krutinin, PhD, A/Professor, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Volgograd Region, Russia, kotyra84@bk.ru

Tatyana V. Krapchetova, Analytical Engineer, AO "Sebyakovcement", 2, Industrialnaya Str., 403342, Mikhailovka, Volgograd Region, Russia, iwankra@mail.ru

Nadezhda A. Inkova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Volgograd Region, Russia, coyote@bk.ru

Olesya K. Pakhomova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Volgograd Region, Russia, *pakhomovaole-sia@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 07.09.2023
Одобрена после рецензирования 11.11.2023
Принята к публикации 21.11.2023

Submitted for publication 07.09.2023
Approved after review 11.11.2023
Accepted for publication 21.11.2023

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 139–151.

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 (6): 139–151.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.16-52:621.644(203)

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-139-151

EDN: XNNNTL

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Петр Владимирович Бурков^{1,2}, Алена Алексеевна Марина²

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

²Национальный исследовательский

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В настоящее время происходит повсеместное внедрение систем автоматизированного мониторинга в производственные процессы. Современные системы автоматизированного мониторинга имеют встроенное программное обеспечение и аналитические модули, позволяющие обрабатывать большой объем данных проектной, исполнительной документации, результатов изысканий и измерений в процессе эксплуатации объектов, а также выполнять комплексный анализ результатов мониторинга с учетом текущих параметров и прогнозировать состояние вечной мерзлоты, выполнять функции планирования и контроля за выполнением программ работ.

В статье рассмотрена возможность использования в процессе изысканий оценки собственных частот и форм колебаний участков надземных строительных конструкций посредством разработанного устройства для контроля пространственного положения.

Целью исследования является разработка метода контроля пространственного положения надземных трубопроводов, сооружаемых и эксплуатируемых в сложных геологических условиях, с использованием системы автоматизированного мониторинга.

Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные данные могут быть использованы в методике контроля пространственного положения строительной конструкции, заключающейся в анализе данных по колебаниям, получаемых

с автоматизированных постов наблюдения, которая позволяет с приемлемой для практики погрешностью оценивать смещение от положения равновесия и частоту колебаний протяженных участков конструкций и определять критическое состояние системы.

Ключевые слова: инженерно-геологические и инженерно-геодезические обследования, воздушное и наземное лазерное сканирование, оценка изменений планово-высотного положения

Для цитирования: Бурков П.В., Марина А.А. Разработка системы автоматизированного мониторинга для контроля планово-высотного положения строительных конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 139–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-139-151. EDN: XNNNTL

ORIGINAL ARTICLE

DEVELOPMENT OF AUTOMATED MONITORING FOR PLANNED-HIGH-ALTITUDE POSITION CONTROL

Petr V. Burkov^{1,2}, Alena A. Marina²

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

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

Abstract. GIS has built-in software and analytical modules that allow processing large data of design, as-built documentation, survey results and measurements during building operation as well as conducting a comprehensive analysis of monitoring results and predict the permafrost state, perform planning and monitoring of works.

Purpose: The paper examines the possibility of using in the survey process in assessment of natural frequencies and vibrations of sections of above-ground buildings using the proposed device to control its spatial position.

Practical implications: The data obtained can be used in monitoring the spatial position of buildings, based on analyzing vibrations data obtained from automated observation posts, which allows to estimate the displacement from the equilibrium position and vibrational frequency of extended objects with an error acceptable for practice and determine the critical state of the system.

Keywords: geological and geodetic surveys, ground-based laser scanning; planned-high-altitude position control

For citation: Burkov P.V., Marina A.A. Development of automated monitoring for planned-high-altitude position control. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 139–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-139-151. EDN: XNNNTL

Введение

Мониторинг объектов строительства в нефтегазовой отрасли выполняется с целью систематического наблюдения, измерения и контроля параметров объектов и окружающей среды [7, 8, 9, 11, 12, 13, 16], а именно:

- состояния грунтов;
- геологических процессов;
- состояния оснований фундаментов;
- геометрии и напряженно-деформированного состояния строительных конструкций.

В рамках геотехнического мониторинга выполняются наземные и дистанционные обследования объектов, в том числе инженерно-геологические и инженерно-геодезические, воздушное и наземное лазерное сканирование. По итогам камеральной обработки результатов обследования осуществляется выдача рекомендаций по реализации компенсирующих мероприятий, включая технические решения [1, 3, 4]. С помощью постоянного контроля процессов, связанных с взаимодействием объекта с грунтом, и мониторинга параметров эксплуатации строительных конструкций в сложных инженерно-геологических условиях можно обеспечить безопасную эксплуатацию для снижения возможного ущерба от аварий [5].

Такой подход представляется возможным, если обеспечивать систематический контроль напряженно-деформированного состояния и пространственного положения в зонах с высоким риском возникновения аварийных ситуаций в трубопроводной системе. В рамках рассматриваемых вопросов обеспечения безаварийной эксплуатации предлагается метод автоматизированного мониторинга, позволяющий непрерывно получать с пунктов наблюдения информацию о пространственном положении объекта, его деформации, определять его критическое отклонение от проектного или исходного положения и сигнализировать персоналу об этом.

В процессе исследования была разработана автоматизированная система контроля пространственного положения наземного объекта. Данная система позволяет осуществлять непрерывный мониторинг пространственного положения и параметров вибрации объекта с помощью датчиков на постах наблюдения. С учетом того, что объект находится под влиянием различных процессов, которые сопровождают его эксплуатацию, непрерывный поток данных с постов наблюдения позволит контролировать и прогнозировать пространственное положение объекта. С помощью разработанного устройства возможно осуществлять наблюдение не только за конкретным участком объекта, но за всей системой в целом, т. к. наблюдательные посты с датчиками размещаются на всем необходимом пространстве и позволяют проводить анализ данных на основе получаемых параметров работы системы.

Любые процессы, происходящие в системе, имеют свойственные им характерные проявления, описываемые определенными параметрами эксплуатации. Разработанная система автоматизированного мониторинга на основе анализа результатов измерений параметров совместно с результатами диагностики и мониторинга системы, эксплуатационной и проектной документации позволяет эти проявления исследовать и оценивать техническое состояние объекта и системы в целом. Кроме того, получение информации от системы мониторинга о возникновении отклонений параметров эксплуатации от установленной нормы дает возможность принимать своевременные и эффективные управленческие решения по предотвращению деформаций трубопроводов.

Предлагаемая система автоматизированного мониторинга позволяет решать следующие задачи:

- выявлять участки деформации объекта (участка трубопровода) на начальном этапе;

- определять зоны высокой сейсмичности;
- оценивать напряженно-деформированное состояние системы;
- определять участки объекта для приоритетных диагностических исследований;
- проводить диагностические обследования.

Приблизительно 50 % неисправностей на объектах трубопроводного транспорта, приводящих к вынужденному простое, тесно связаны с технологическим процессом. При этом 90 % из них являются прогнозируемыми и даже контролируемыми. Соответственно, при наличии базы данных о параметрах эксплуатации объекта посредством системы обработки данных и интеллектуализированных систем (использование искусственного интеллекта) возможно прогнозировать процессы, приводящие к деформациям трубопровода и, как следствие, авариям.

Обобщая вышесказанное, следует отметить, что непрерывный поток данных о состоянии системы, интегрированный в систему автоматизации технологического процесса, позволит снизить риск возникновения дефектов, непредвиденных аварий, а также принимать эффективные управленческие решения в области проведения мероприятий по геотехническому мониторингу и ремонту трубопроводной системы.

Цель работы – разработка метода контроля пространственного положения надземных трубопроводов, эксплуатируемых в сложных геологических условиях, с применением системы автоматизированного мониторинга.

Постановка задачи, методы исследования и эксперимент

Для обеспечения проведения замеров параметров эксплуатации, передачи и обработки данных система автоматизированного мониторинга включает в себя четыре блока.

1. Блок измерений.
2. Блок передачи данных.
3. Блок хранения данных.
4. Блок обработки данных.

Блок измерений посредством технических средств, а именно датчиков, осуществляет измерение параметров, характеризующих пространственное положение объекта и процесс его эксплуатации, а также передает данные в блок передачи данных. Блоки измерений, передачи, хранения и обработки данных располагаются непосредственно на исследуемом объекте, в случае мониторинга участка трубопровода – это сам трубопровод или его опоры при надземном исполнении. Места установки блоков считаются наблюдательными пунктами.

Для контроля и регистрации перемещения объекта используется модуль 3-осевого гироскопа и акселерометра MPU-6050. В основе данного модуля лежит микросхема MPU-6050, в которой размещаются два датчика: акселерометр и гироскоп. Гироскоп измеряет угловые скорости по трем осям с разными пределами измерений: 250, 500, 1000 и 2000 град/с. Акселерометр, или датчик вибрации, измеряет ударное и вибрационное ускорение в системах диагностики. Акселерометр микросхемы MPU-6050 использует пьезоэлектрический эффект, обеспечивая расширенный частотный диапазон, хорошую чувствительность

и высокое разрешение. Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет определять движение тела в трехмерном пространстве. Их данные предварительно обрабатываются и непрерывно передаются через интерфейс I2C на микроконтроллер. Для наиболее точного трекинга быстрых и медленных движений возможно запрограммировать необходимые режимы: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 град/с для гироскопа, а также $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$ – для акселерометра. Необходимое напряжение питания для модуля – от 3,5 до 6 В [10, 14, 15].

Блок передачи данных необходим для сбора информации со всех наблюдательных пунктов и передачи ее в блок хранения данных и далее оператору посредством mesh-сети, позволяющей отдаленным наблюдательным пунктам выступать передатчиками информации, что обеспечивает непрерывный поток данных с устройств.

Блок хранения данных осуществляет прием, первичную обработку и хранение полученной с наблюдательных пунктов информации.

Блок обработки данных необходим для определения положения в пространстве и отображения параметров эксплуатации объекта, визуализации результатов измерений и расчетов, а также выработки управленческих решений. Блок обработки данных представляет собой удаленное автоматизированное рабочее место со специальным программным обеспечением, которое позволяет исследовать влияние геотехнических процессов на объект исследования, а именно на участок трубопровода, и вырабатывать управленческие решения по проведению плановых и дополнительных мероприятий по диагностике или ремонту объекта. Также блок обработки данных сигнализирует оператору о превышении контролируемых параметров их уставок (пороговых значений) [6].

Блоки, объединенные в устройство, устанавливаются на наблюдательных пунктах, расстояние между которыми может варьироваться от 20 м до 6 км. После установки устройство практически не нуждается в обслуживании, т. к. его конструкция предусматривает автономное функционирование.

Помимо блоков, обеспечивающих измерение параметров, передачу и обработку информации, устройство включает в себя автономные источники электропитания:

- литий-полимерный аккумулятор, 3500 мА·ч;
- солнечная панель размером 95×95 мм, напряжение 5,5 В, мощность 1 Вт;
- преобразователь DC/DC повышающий (с 2,5 до 5 В);
- модуль Пельтье TEC1-12712, принцип действия которого основан на эффекте Пельтье (охлаждение или нагрев элемента при прохождении через него электрического тока);
- радиатор 100×70 мм.

Для обеспечения автономности системы автоматизированного мониторинга в разработанном устройстве используется обратный эффект элемента Пельтье, заключающийся в возникновении электрического тока в замкнутой цепи из двух проводников, контакты которых имеют разную температуру. Поскольку устройство устанавливается на трубопровод, возникает разница температур между стенкой трубопровода и окружающей средой. Бесперебойное питание разработанного прибора осуществляется при помощи модуля зарядного

устройства (ЗУ). Для этого к модулю ЗУ TP4056 подключены литий-полимерный аккумулятор, солнечная панель и элемент Пельтье, благодаря которым происходит питание ЗУ. Модуль зарядного устройства также заряжает аккумулятор, и при отсутствии источника питания питание для контроллера поступает от аккумулятора. Для подключения к элементу Пельтье используется модуль, повышающий постоянное напряжение до 5 В, – преобразователь DC/DC, повышающий с 2,5 до 5 В. Сам элемент Пельтье помещается в теплоизоляцию (вспененный каучук) и устанавливается на внешнюю поверхность трубопровода при помощи термопроводящей клейкой пасты, к нему с помощью той же пасты крепится радиатор, над которым расположена солнечная панель. Таким образом достигается наибольший перепад температур для выработки электрического тока элементом Пельтье. При помощи такой системы питания обеспечивается автономность разработанного устройства. Устройство соответствует требованиям:

- электробезопасности: потребляемая мощность – 5 Вт;
- пожаровзрывобезопасности: в собранном виде устройство крепится на внешней поверхности трубопровода при помощи термопроводящей клейкой пасты.

Энергопотребление устройства снижается за счет его программирования на работу по заданному графику в короткие промежутки времени.

Стоит учитывать, что при эксплуатации таких объектов, как трубопроводные системы, возникают интенсивные волновые процессы, вызываемые колебаниями давления, гидроударами и т. д., и вибрационные процессы в результате работы насосных агрегатов, изменения режима работы системы, аварийных отключений электроэнергии, ошибочных действий обслуживающего персонала. Все перечисленные факторы приводят к возникновению дополнительных напряжений в стенках трубопровода. Рассматриваемые причины обычно не учитываются при проектировании трубопроводных систем. Так, при проектировании магистральных трубопроводов учитываются все воздействия, касающиеся их нагрузки: изменения температуры, вес засыпки, ветровые и снеговые нагрузки и т. д., за исключением динамического характера нагружения стенки трубопровода при технологических операциях. Нормативные документы различных отраслей промышленности в основном регламентируют допустимые значения некоторых параметров, например уровня вибрации трубопроводов. Так, по нормам Мингазпрома СССР, аварийный уровень вибрации измеряется значением виброскорости $v_e = 18$ мм/с и величиной амплитуды перемещения трубопровода $A = 1,2$ мм [2, 6]. При этом повышенная вибрация трубопроводов может привести к преждевременному износу и технологическим авариям. В свою очередь, параметры вибрации, такие как перемещения объекта по осям x , y , z , позволяют описывать пространственное положение объекта.

Для разработки методики контроля пространственного положения трубопровода, осуществляемого разработанной системой автоматизированного мониторинга, проведены экспериментальные исследования, основанные на регистрации параметров вибрации (колебаний) фрагмента трубопровода модулем MPU-6050. Основными величинами, характеризующими вибрацию, являются:

частота колеблющегося тела f , Гц; амплитуда смещения от положения равновесия A , мм; скорость колебания тела v , м/с; ускорение a , м/с². Значениями амплитуды смещения A часто ограничивают допустимую вибрацию агрегатов и фундаментов. Колебательная скорость v поверхности характеризует уровень возникающего шума, а ускорение a определяет действующие динамические силы. Таким образом, опираясь на данные параметры, можно судить о состоянии системы и о процессах, происходящих в ней. Гипотеза экспериментального исследования заключается в том, что данные по амплитуде смещения A , мм, по осям x , y , z и частота колебаний f , Гц, трубопровода позволят сделать вывод о его пространственном положении и техническом состоянии. Оценка технического состояния трубопроводной системы будет производиться на основании сравнения фактических величин частоты колебаний и смещений трубопровода с допустимыми уровнями вибрации согласно нормативной документации. Для проведения экспериментального исследования использовался фрагмент трубопровода, изготовленного из стали Ст 20, внутренний диаметр $d = 219$ мм, толщина стенки $\delta = 8$ мм. Конструктивно экспериментальная установка состоит из фрагмента трубы, располагающейся на опорах.

Обсуждение результатов исследований

Для генерации внешнего вибрационного воздействия на фрагмент трубопровода, приближенного к происходящему в момент эксплуатации системы, использовался генератор колебаний с функцией настраивания производимой частоты колебаний. При проведении исследования воспроизводились колебания частотами 5, 10, 15, 20, 25, 30 Гц (рис. 1–6, таблица).

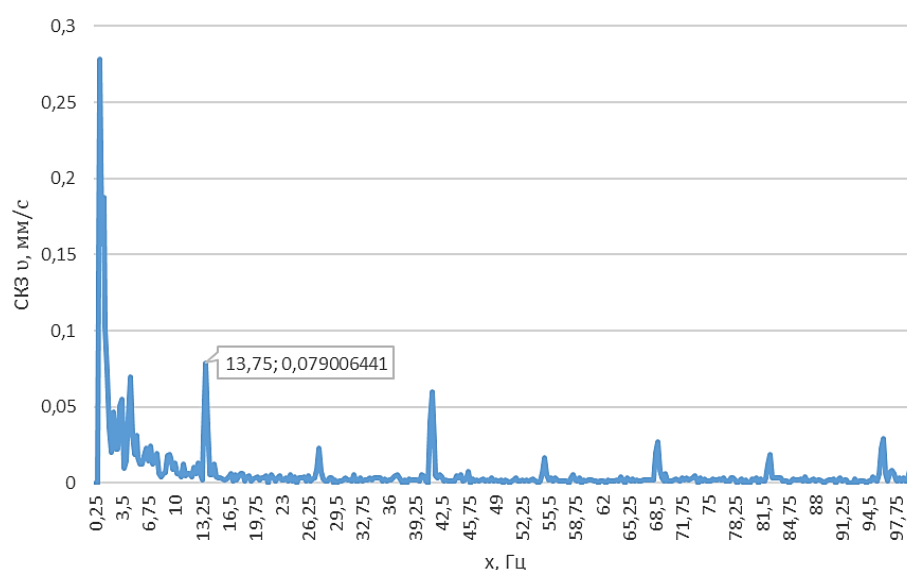


Рис. 1. График распределения частоты колебаний f , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ v , мм/с, в точке 1, частота 5 Гц

Fig. 1. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 1. Frequency: 5 Hz

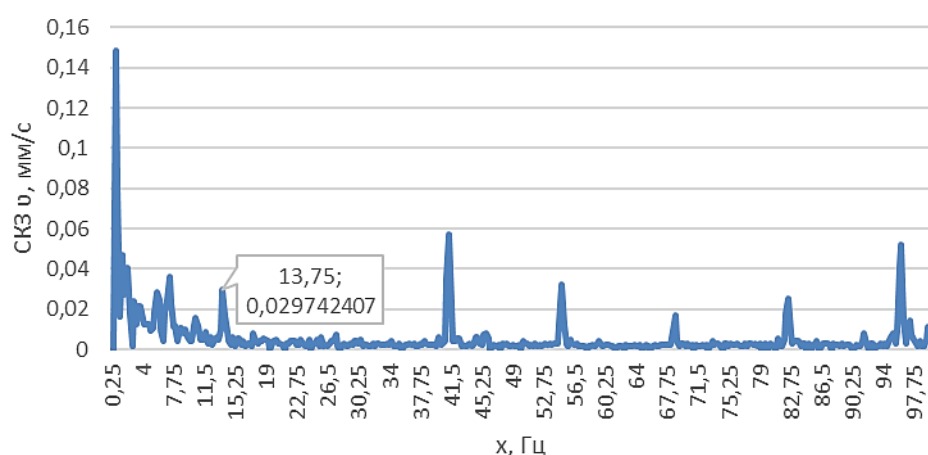


Рис. 2. График распределения частоты колебаний f , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ v , мм/с, в точке 2, частота 5 Гц

Fig. 2. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 2. Frequency: 5 Hz

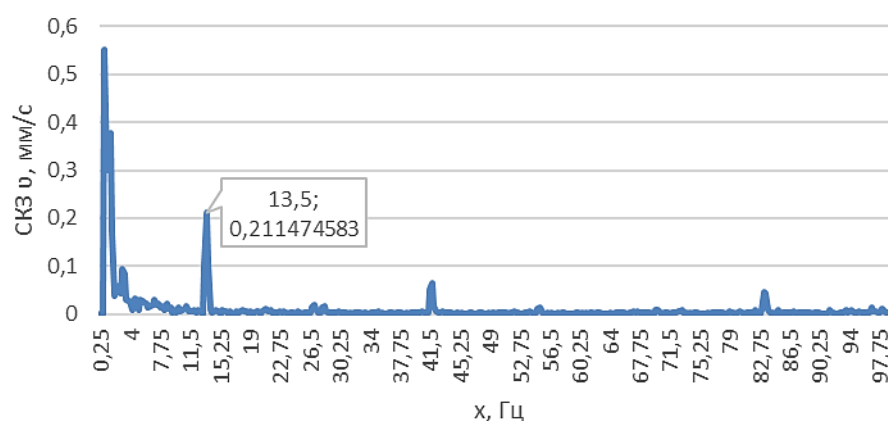


Рис. 3. График распределения частоты колебаний f , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ v , мм/с, в точке 1, частота 15 Гц

Fig. 3. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 1. Frequency: 15 Hz

Замеры параметров вибрации проводились модулем гироскопа и акселерометра MPU-6050, подключенным к микроконтроллеру ESP32. При программировании микроконтроллера модулю MPU-6050 задавалась функция записи виброскорости по осям x , y , z , которая в дальнейшем пересчитывается в смещение объекта. Анализ данных с датчика в микроконтроллере происходил с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Быстрое преобразование Фурье – это алгоритм обработки сигналов и анализа данных, позволяющий получить из временной зависимости сигнала его частотные компо-

ненты, т. е. провести спектральный анализ. В результате были получены графики распределения частот колебаний f , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ v , мм/с.

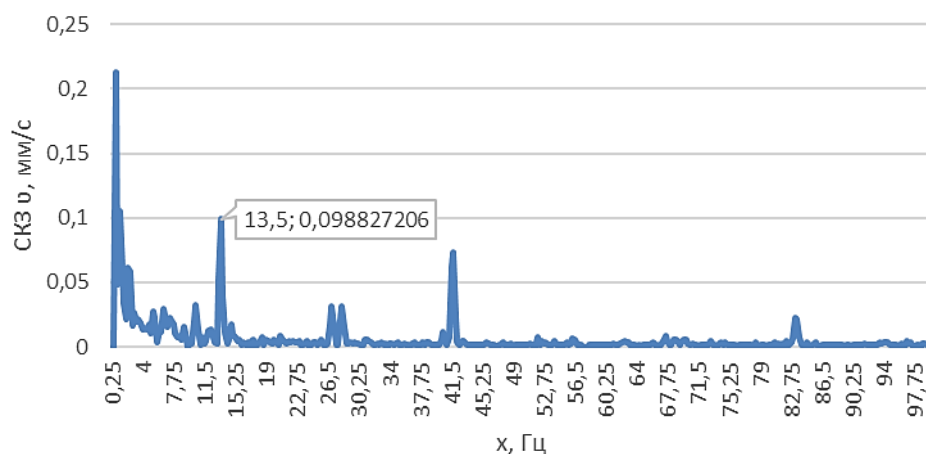


Рис. 4. График распределения частоты колебаний f , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ v , мм/с, в точке 2, частота 15 Гц

Fig. 4. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 2. Frequency: 15 Hz

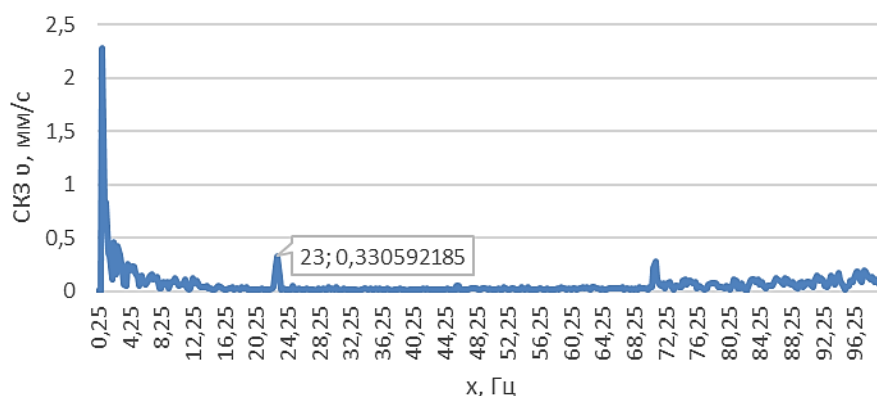


Рис. 5. График распределения частоты колебаний f , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ v , мм/с, в точке 1, частота 25 Гц

Fig. 5. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 1. Frequency: 25 Hz

При проведении исследования замеры параметров вибрации проводились в двух точках на разных концах фрагмента трубопровода.

Графики колебаний по результатам БПФ позволяют определить частоту колебаний трубопровода. При интерпретации полученных графиков использовалась методика диагностики дефектов вращающегося оборудования по

спектрам вибросигналов, в соответствии с которой частота колебаний трубопровода определяется по левому пику на графике (см. рис. 1) после его зашумленной части (после 6,25 Гц). Таким образом, получены значения частоты колебаний фрагмента трубопровода, представленные в таблице.

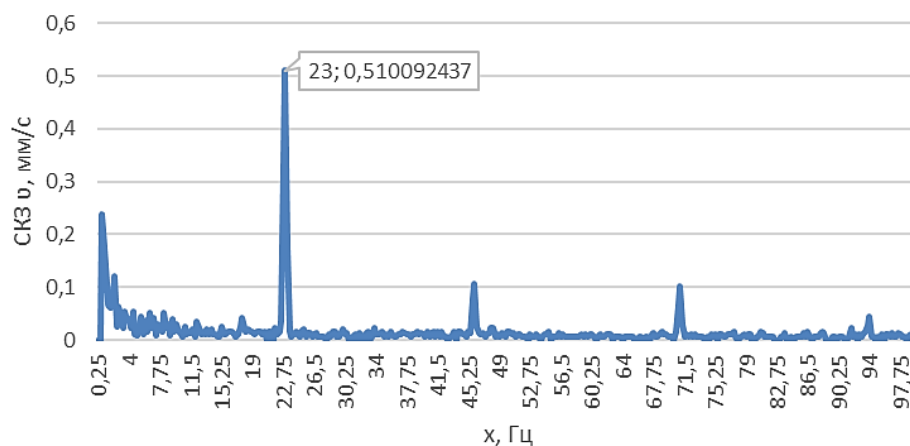


Рис. 6. График распределения частоты колебаний f , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ v , мм/с, в точке 2, частота 25 Гц

Fig. 6. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 2. Frequency: 25 Hz

Значения частоты колебаний фрагмента трубопровода в двух точках Vibrational frequency of pipeline at two points

Сгенерированная вибрация, Гц	Частота вибрации трубопровода по БПФ в точке 1, Гц	Частота вибрации трубопровода по БПФ в точке 2, Гц	СКЗ виброскорости по БПФ в точке 1, мм/с	СКЗ виброскорости по БПФ в точке 2, мм/с	Критическое значение виброскорости, мм/с
5	13,75	13,75	0,08	0,03	18
10	9	9	0,10	0,07	
15	13,5	13,5	0,21	0,1	
20	18,5	18,5	0,26	0,26	
25	23	23	0,33	0,51	
30	28	28	0,51	1,07	

Сравнение полученной частоты по БПФ с допустимой частотой позволяет определить состояние трубопровода и сформулировать рекомендации по проведению визуального осмотра трубопровода и внеплановых диагностических обследований. Расчетная точность замеров, полученных при помощи модуля гироскопа и акселерометра MPU-6050, составила 1,8 мм, при этом точность геодезических измерений составляет около 2 мм, замеров при помощи GPS – 200 мм.

Формулирование рекомендаций зависит от получаемых от системы параметров, например, как отмечено в [6], если измеряемые виброскорость и амплитуда смещения трубопровода находятся в пределах допустимых значений, но при этом отличаются от замеренных ранее, необходимо провести расчет напряженно-деформированного состояния участка трубопровода с последующим сравнением напряжений с предельными значениями из РД. При этом, если значения напряжений в пределах допустимых, необходимо принять превентивные меры по диагностике указанного участка, провести оценку прочности с учетом полученных при расчете кольцевых и продольных напряжений. При превышении расчетных напряжений допустимых значений предлагается провести работы по неразрушающему контролю стыков и сварных соединений, внеплановую диагностику и визуальный осмотр трубопровода.

Выводы

Выполненные расчеты позволили сделать следующие выводы:

1. Разработан метод контроля пространственного положения трубопровода посредством системы автоматизированного мониторинга. Метод основан на анализе параметров вибрации объекта с последующей обработкой данных для выработки управленческих решений.
2. Система автоматизированного мониторинга является универсальной вследствие модульной конструкции. В систему могут быть включены другие модули для измерения дополнительных параметров.
3. Система автоматизированного мониторинга способна оповещать оператора при возникновении критических отклонений измеряемых параметров от допустимой нормы.
4. Предлагаемая система характеризуется низкой стоимостью комплектующих и простотой использования, что обеспечивает существенную экономию трудовых и финансовых ресурсов в рамках автоматизации процесса эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров А.А., Ларионов В.И., Гумеров Р.А. Автоматизированная система мониторинга магистральных нефтепроводов на сейсмоопасных участках // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 5 (98). С. 113–126.
2. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. Москва : ФГУП «Картгеоцентр», 2004. 355 с.
3. Грязнев Д.Ю. Аэровизуальный мониторинг технического состояния магистрального нефтепровода, подверженного воздействию экзогенных геологических процессов // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 8. С. 47–50.
4. Даревский В.Э., Романов А.М., Ткачева М.В. Автоматизированные инженерные методы расчетов общей устойчивости склонов, зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 9. С. 16–21.
5. Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С. и др. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–142.
6. Нормы вибрации трубопроводов технологического газа компрессорных станций с центробежными нагнетателями // Консорциум «Кодекс»: Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003197> (дата обращения: 22.11.2023).

7. Рекам Ф.В. Расчет допустимых динамических нагрузок на трубопровод // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3. С. 62–63.
8. Ding X., Yin S., Wang Y., Wang Y., Yang Y., Ni B. Data-driven design of observers and its applications // Preprint of the 18th IFAC World Congress. 2011. P. 11441–11446. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016305481> (дата обращения: 22.11.2023).
9. Parker T., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Roger A.J. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter Letters // IEEE Photonics Technology. 1977. July. V. 9. I. 7. P. 979–981. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/593372> (дата обращения: 22.11.2023).
10. Priyanka E.B., Thangavel S., Gao X.Z. Review analysis on cloud computing based smart grid technology in the oil pipeline sensor network system // Petroleum Research. 2021. V. 6. № 1. P. 77–90.
11. Rosen P., Hensley S., Joughin I. et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry // Proceedings of the IEEE. 2000. V. 88 (3). P. 333–382. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/> (дата обращения: 05.09.2023).
12. Rykov V., Kochueva O., Farkhadov M. Preventive Maintenance of a k-out-of-n System with Applications in Subsea Pipeline Monitoring // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. V. 9. № 1. P. 85.
13. Tejedor J., Macias-Guarasa J. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats // Sensors. 2017. V. 17. № 2. P. 355.
14. Thiberville C., Wang Y., Waltrich P. Modeling of Smart Pigging for Pipeline Leak Detection // SPE Production & Operations. 2020. V. 35. № 03. P. 610–627.
15. Thodi P., Paulin M., DeGeer D. Real-time Arctic pipeline integrity and leak monitoring // OTC Arctic Technology Conference. OnePetro. 2015. ISBN: 978-1-61399-431-3. URL: https://www.researchgate.net/publication/314698366_Real-time_Arctic_Pipeline_Integrity_and_Leak_Monitoring (дата обращения: 22.11.2023).
16. Varshney S., Kumar C., Swaroop A. Leach based hierarchical routing protocol for monitoring of over-ground pipelines using linear wireless sensor networks // Procedia Computer Science. 2018. V. 125. P. 208–214.

REFERENCES

1. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Gumerov R.A. Automated system for monitoring main oil pipelines in seismic areas. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie*. 2014; 5 (98): 113–126. (In Russian)
2. Genicke A.A., Pobedinsky G.G. Global satellite determination systems locations and their application in geodesy. Moscow: Cartgeocenter, 2004. 355 p. (In Russian)
3. Gryaznev D.Yu. Aerovisual monitoring of the technical condition of a main oil pipeline exposed to exogenous geological processes. *Bezopasnost zhiznediatelnosti*. 2011; (8): 47–50. (In Russian)
4. Darevsky V.E., Romanov A.M., Tkacheva M.V. Automated engineering methods for calculating general stability of slopes and buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2006; (9): 16–21. (In Russian)
5. Dmitriev P.N., Golubev V.I., Isaev Yu.S., et al. Processing and interpretation satellite radar interferometry data on monitoring landslide processes. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. 2012; 9 (2): 30–142. (In Russian)
6. Vibration standards for process gas pipelines of compressor stations with centrifugal superchargers. Available: <http://docs.cntd.ru/document/1200003197> (accessed December 22, 2023). (In Russian)
7. Rekam F.V. Calculation of the permissible dynamic loads on a pipeline. *Stroitelnaia mekhanika inzhenernykh konstruktov i sooruzhenii*. 2008; (3): 62–63. (in Russian)
8. Ding X., Yin S., Wang Y., Wang Y., Yang Y., Ni B. Data-driven design of observers and its applications. Available: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016305481 (accessed December 22, 2023).

9. Parker T., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Roger A.J. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter Letters. *IEEE Photonics Technology*. 1977. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/593372> (accessed December 22, 2023).
10. Priyanka E.B., Thangavel S., Gao X.Z. Review analysis on cloud computing based smart grid technology in the oil pipeline sensor network system. *Petroleum Research*. 2021; 6 (1): 77–90.
11. Rosen P., Hensley S., Joughin I., et al. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*. 2000; 88 (3): 333–382. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/> (accessed September 5, 2023).
12. Rykov V., Kochueva O., Farkhadov M. Preventive maintenance of a k-out-of-n system with applications in subsea pipeline monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021; 9 (1): 85.
13. Tejedor J., Macias-Guarasa J. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats. *Sensors*. 2017; 17 (2): 355.
14. Thiberville C., Wang Y., Waltrich P. Modeling of smart pigging for pipeline leak detection. *SPE Production and Operations*. 2020; 35 (3): 610–627.
15. Thodi P., Paulin M., DeGeer D. Real-time Arctic pipeline integrity and leak monitoring. In: OTC Arctic Technology Conference. OnePetro, 2015. ISBN: 978-1-61399-431-3. Available: www.researchgate.net/publication/314698366_Real-time_Arctic_Pipeline_Integrity_and_Leak_Monitoring (accessed December 22, 2023).
16. Varshney S., Kumar C., Swaroop A. Leach based hierarchical routing protocol for monitoring of over-ground pipelines using linear wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*. 2018; 125: 208–214.

Сведения об авторах

Бурков Петр Владимирович, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

Марина Алена Алексеевна, ассистент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, a_a_marina@inbox.ru

Authors Details

Petr V. Burkov, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; burkovpv@mail.ru

Alena A. Marina, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; a_a_marina@inbox.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 17.10.2023
Одобрена после рецензирования 23.10.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 17.10.2023
Approved after review 23.10.2023
Accepted for publication 09.11.2023

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 152–168.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 152–168.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.644.2:620.193.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-152-168

EDN: WIGSTF

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СВАЙНОГО ОСНОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Петр Владимирович Бурков^{1,2}, Александр Эдуардович Волков²

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

²*Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность. Одной из основных проблем, связанных с эксплуатацией строительных сооружений на поверхности в пределах криолитозоны, является деформация опорных систем вследствие изменения геометрических параметров грунта. Применяемые сегодня методы оценки технического состояния зданий, сооружений и опорных систем не универсальны. Одним из важных показателей при эксплуатации зданий и сооружений, позволяющих определить техническое состояние системы «многолетнемерзлый грунт – свайное основание – сооружение», является амплитуда колебаний опорной конструкции.

Цель исследования: проведение всесторонней оценки надежности свайного основания в Арктической зоне Российской Федерации.

Для сбора данных об условиях в реальном времени использовались современные методы мониторинга и дистанционного зондирования.

Результаты. Произведено численное моделирование, позволяющее оценить долгосрочные тенденции в изменении метеорологических параметров и их влияние на свайные основания. Разработаны новые методы и технологии для повышения устойчивости свайных конструкций в условиях морозного климата и перманентного мерзлотного грунта.

Основные результаты данного исследования могут быть применены при эксплуатации и проектировании зданий и сооружений в условиях постоянной мерзлоты. Более того, эти результаты могут быть использованы для разработки новых технологий и техни-

ки, способных увеличить эффективность работы в нефтегазовой отрасли и других областях, связанных с использованием инженерных сооружений в Арктической зоне России.

Ключевые слова: надежность, свайный фундамент, оценка температурного поля, численный эксперимент, многолетний мерзлый грунт

Для цитирования: Бурков П.В., Волков А.Э. Оценка надежности свайного основания в Арктической зоне РФ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 152–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-152-168. EDN: WIGSTF

ORIGINAL ARTICLE

RELIABILITY OF PILE FOUNDATIONS IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

Petr V. Burkov^{1,2}, Aleksandr E. Volkov²

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

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. One of the main problems associated with the operation of building structures in permafrost conditions, is the deformation of support systems due to changes in soil geometric parameters. The methods used today for assessing the health of buildings and support systems are not universal. One of the important indicators during the buildings operation, which allows us to determine the health of the permafrost soil–pile foundation–structure system, is the vibrational amplitude of the supporting structure.

Purpose: The aim of this work is to conduct a comprehensive analysis of the pile foundation reliability in the Arctic zone of the Russian Federation.

Methodology/approach: Modern monitoring and remote sensing technologies are used to collect the real-time data. Numerical modeling was carried out to assess long-term trends in changes in meteorological parameters and their impact on pile foundations. New methods and technologies are developed to improve the stability of pile structures in permafrost conditions and permanently frozen soil.

Practical implications: The obtained results can be used in design and operation of buildings in permafrost conditions. Moreover, these results can be used to develop new technologies and equipment for improving the performance in the oil and gas and other industries relating to engineering structures in the Arctic zone of Russia.

Keywords: reliability, pile foundation; temperature field assessment; numerical experiment; permafrost conditions

For citation: Burkov P.V., Volkov A.E. Reliability of pile foundations in the Arctic zone of the Russian Federation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 152–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-152-168. EDN: WIGSTF

Введение

Один из самых значимых аспектов процесса теплопередачи заключается в расчете потерь тепла зданиями. Моделирование температурных показателей в зданиях и окружающих его слоях почвы позволяет определить количество тепла, утраченного через стены, крышу и пол на протяжении года. Свободное движение тепла при этом описывается системой уравнений конвекции. Решению аналитических и числовых уравнений посвящено множество исследова-

ний [1, 4, 7, 10, 11, 12]. Для моделирования сложных процессов конвекции тепла многие исследователи используют упрощенные допущения, которые облегчают математическое описание этих процессов и их решение [2, 3, 7, 8]. Решение краевых задач в трех измерениях и сложной геометрии – прикладная проблема, требующая использования неоднородных расчетных сеток с малыми интервалами для учета геометрических факторов. В настоящее время существует множество вычислительных программ различного уровня абстракции, предназначенных для моделирования физических процессов, описываемых частными производными. Одной из них является FEniCS – вычислительная платформа, основанная на методе конечных элементов, которая специализируется на решении краевых задач на основе дифференциальных уравнений. Однако стоит отметить, что данные методы имеют ограничения и применимы не во всех ситуациях [13].

Возможности этой платформы включают использование различных библиотек, таких как PETSc, Trilinos/Epetra, uBLAS и MTL4, для решения линейных алгебраических задач. Кроме того, платформа автоматизирует процесс решения и нелинейных задач. Она также поддерживает параллельные вычисления и предлагает использование различных типов конечных элементов, включая прерывистые методы Галеркина и векторные элементы. Платформа доступна для операционных систем Linux, Windows и Mac OS [14].

Аппроксимация во времени включает использование стандартной неявной схемы. Эта схема позволяет решить проблему свободной конвекции и аппроксимировать атмосферный поток во времени.

Основой алгоритма расчета является метод конечных элементов, который учитывает геометрию и усложнение моделируемого объекта. Таким образом, математические модели, основанные на уравнениях теплопроводности, используются для описания сложных процессов теплообмена. Эти модели учитывают фазовый переход поровой воды (вода-лед) и позволяют моделировать климатический режим грунта [14, 15].

Математические модели, основанные на уравнениях теплопроводности, применяются для количественного анализа теплообмена не только фазового перехода в породе (вода-лед), но и для моделирования глобального режима грунта. Для решения задач свободной конвекции используется приближение Буссинеска – алгоритм расчета, основанный на методе конечных элементов, полностью учитывающий геометрию и комплексирование моделируемого объекта. В данных числах также применяется стандартная неявная схема для временной аппроксимации [5, 6, 9].

Постановка задачи, методы исследования и эксперимент

В пределах исследуемого участка находятся многолетнемерзлые породы с предполагаемой мощностью от 30 до 50 м и среднегодовой температурой грунта $-1,7$ °С. Для выполнения теплотехнического расчета теплофизические характеристики грунта вокруг опоры газопровода были определены согласно табл. 1 и 2.

Тепловые свойства и теплопроводность почвы можно описать как функцию ее температуры. Для этого был использован надземный трубопровод, который находился на высоте не менее 1,6 м над землей. Также были использова-

ны подпорки для трубопроводов, изготовленные из двух стоек с траверсами из прокатного профиля. Сам трубопровод представлял собой трубу диаметром 325 и 377 мм соответственно. Основания свайных опор были выполнены из металлических труб соответствующего размера. Жесткие неподвижные опоры имели форму неизменяемых двухстоечных конструкций на свайном фундаменте, способных воспринимать горизонтальные нагрузки. Компенсаторы также имели двухстоечную конструкцию с траверсами из прокатного профиля, а расстояние между опорами и их количество определялись диаметром исследуемого газопровода или нефтепровода и длиной компенсатора (рис. 1).

Таблица 1

Особенности климата в регионе добычи

Table 1

Climatic conditions in the oil field

Название показателя материала	Наименование материала			
	Суглинок	Супесь	Песок	Торф
Температура, °C	–1,6	–1,6	–1,3	–1,1
Мощность грунтов, м	14,2	5,9	1,91	0,19
Суммарная весовая влажность грунта, д. е.	0,32	0,21	0,19	3,51
Взаимосвязь между количеством воды, остающейся в жидком состоянии, и температурой окружающей среды	Аналогичная суглинка ($0,07 < l_p < 0,13$)	Аналогичная супеси ($0,19 < l_p < 0,07$)	Аналогичная песку ($l_p < 0,19$)	Аналогичная торфу
Плотность сухого грунта, кг/м ³	1523	1803	1702	1201
Температура фазового перехода, °C	–0,29	–0,38	–0,29	0
Теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м ³ ·°C)	1,87	1,8	2,4	1,29
Теплопроводность талого грунта, Вт/(м ³ ·°C)	1,6	1,59	1,94	0,09
Коэффициент фильтрации, м/с	49	9	107	49
Объемная теплоемкость мерзлого грунта, МДж/(м ³ ·°C)	2,36	2,21	2,14	2,28
Объемная теплоемкость талого грунта, МДж/(м ³ ·°C)	3,28	2,29	2,41	3,9

Таблица 2

Физические характеристики грунтов месторождения

Table 2

Physical characteristics of deposit soils

Параметр	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура воздуха, °С	–26,4	–26,4	–19,2	–10,3	–2,6	8,4	15,4	11,3	5,2	–6,3	–18,2	–24
Скорость ветра, м/с	2,3	2,1	2,1	2,4	2,4	2,1	1,8	1,3	1,9	2,3	2,3	2,4
Высота снежного покрова, м	0,47	0,49	0,51	0,47	0,16	0	0	0	0	0,18	0,25	0,38
Тепловой поток на бетонную плиту, Вт/м ²	1,54	16,98	67,28	126,23	198,15	248,46	237,04	164,51	97,53	31,48	7,41	1,54
Тепловой поток на поверхность грунта, Вт/м ²	0,48	5,3	21,03	39,45	61,92	77,64	74,07	51,41	30,48	9,84	2,31	0,48

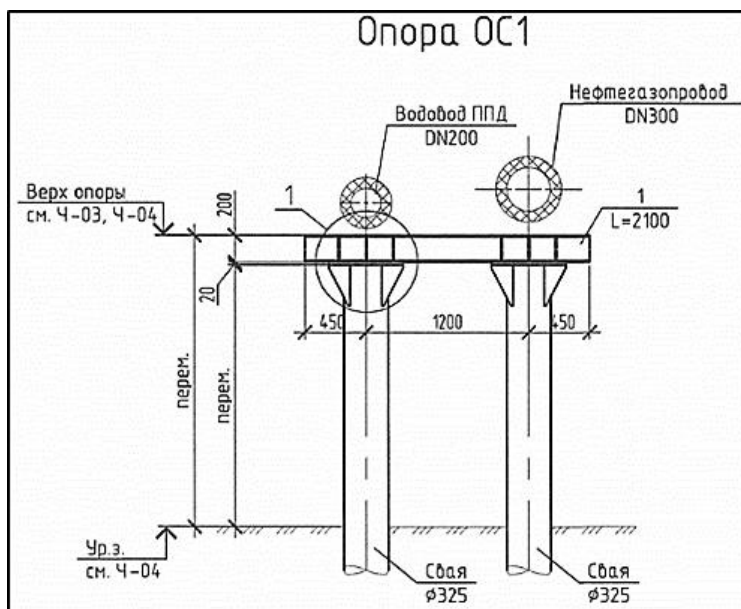


Рис. 1. Схемы двухстоечной опоры ОС1

Fig. 1. Schematic of two-rack support OS1

На данный момент проводится исследование изменения теплового поля почвы в условиях вечной мерзлоты методом конечных элементов. Для создания модели основания была использована трехмерная модель, которая располагалась в верхней части вечномерзлых грунтов.

Для определения прочности грунта требуется решить задачу о тепловом взаимодействии опоры и мерзлой почвы и, исходя из нее, рассмотреть прогноз

температурного режима. При моделировании температурного режима вечной мерзлоты в расчетной области начальные условия вводятся следующим образом. На нижних границах расчетной области устанавливаются начальные условия первого типа, где температура остается постоянной и равной $-1,7^{\circ}\text{C}$. На всех боковых границах расчетной области задается условие, при котором тепловой поток равен нулю. Чтобы учесть теплообмен между поверхностью грунта и атмосферой, на верхней границе расчетной модели применяется граничное условие третьего типа. Это условие определяется коэффициентом теплообмена $\alpha_{\text{прв}}$ и средней температурой $T_{\text{ср}}$. Для определения степени черноты поверхности почвы и коэффициента излучения учитываются чернота поверхности почвы и температура теплового излучения. Для расчета влияния снежного покрова на теплообменный процесс поверхности почвы используются данные о толщине снежного покрова и температуре воздуха. Затем, используя численное решение уравнения теплопроводности в моделируемой области, для разных временных моментов получают трехмерное температурное распределение. Это тепловое поле в последующем используется для изменения физических свойств почвы и анализа температурных режимов. В результате анализа принимаются решения по повышению прочности почвы. Были рассмотрены два варианта: моделирование стоек с полным погружением фундамента и моделирование стоек с фундаментом, расположенным на расстоянии 0,8 м от них.

На рис. 2–4 линиями температурной изоляции в поперечном сечении моделируемого участка показано расчетное температурное поле в смоделированном сечении газопровода. Результаты моделирования представлены на рис. 5–7 в виде изолированных линий температурного поля вокруг опоры газопровода, основание которой находится на высоте 0,8 м.

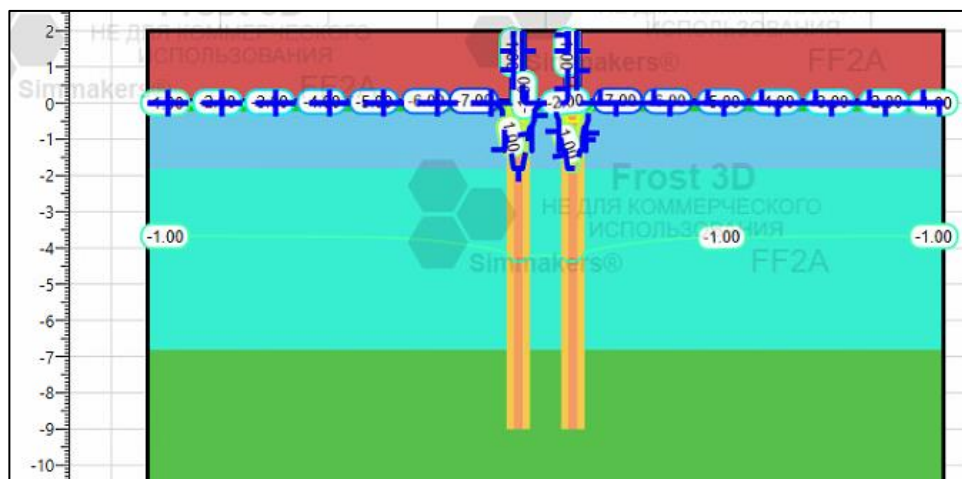


Рис. 2. Результаты моделирования теплового поля при заложении фундаментов на всю глубину на май 2023 г.

Fig. 2. Thermal field simulation for foundations at full depth on May 2023

На основе анализа данных рис. 2–4 видно, что наличие опоры трубопровода в многолетнемерзлом грунте существенно влияет на динамику темпера-

турного поля с течением времени. Это свидетельствует о том, что опора оказывает значительное воздействие на состояние почвы, а следовательно, на ее прочность и надежность газопровода.

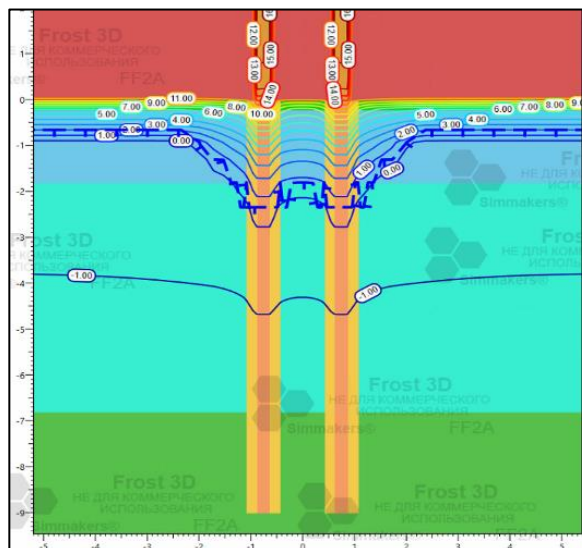


Рис. 3. Результаты моделирования теплового поля при заложении фундаментов на всю глубину на июль 2023 г.

Fig. 3. Thermal field simulation for foundations at full depth on July 2023

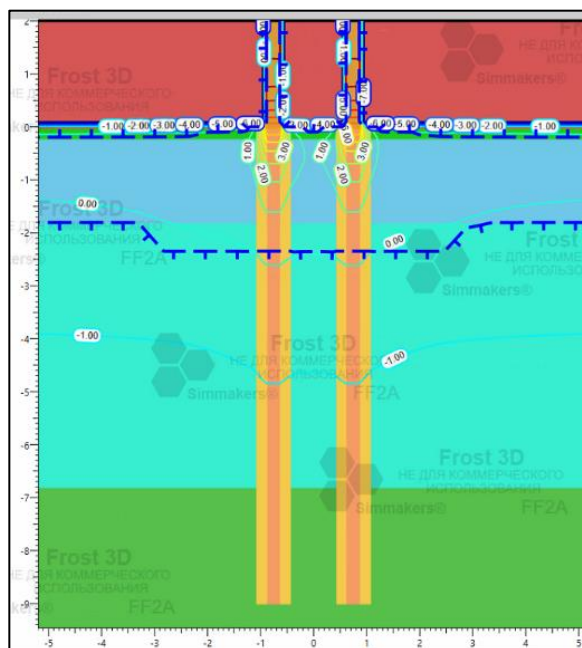


Рис. 4. Результаты моделирования теплового поля при заложении фундаментов на всю глубину на сентябрь 2023 г.

Fig. 4. Thermal field simulation for foundations at full depth on September 2023

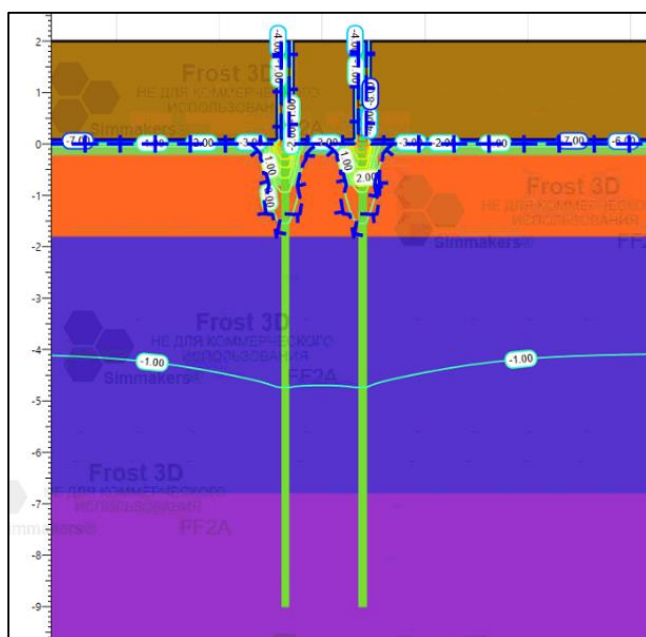


Рис. 5. Результаты моделирования теплового поля на май 2023 г.

Fig. 5. Thermal field simulation on May 2023

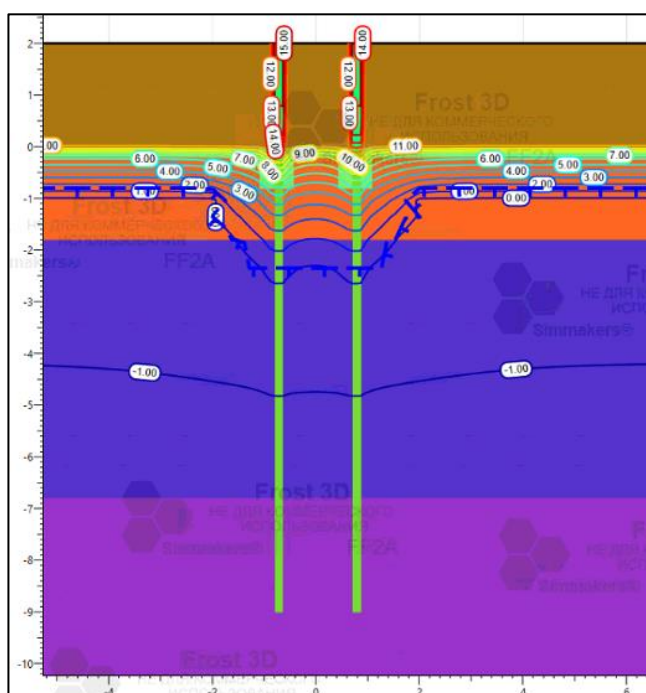


Рис. 6. Результаты моделирования теплового поля на июль 2023 г.

Fig. 6. Thermal field simulation on July 2023

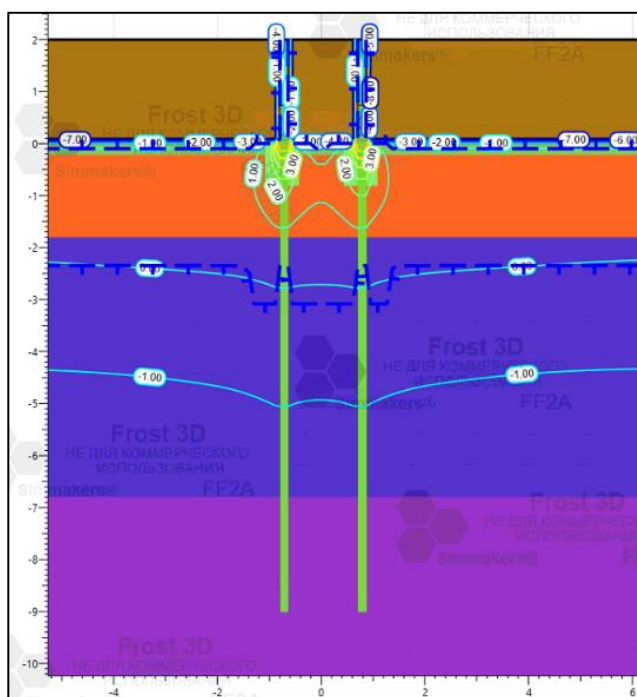


Рис. 7. Результаты моделирования теплового поля на сентябрь 2023 г.

Fig. 7. Thermal field simulation on September 2023

С 2009 г. отдел геомониторинга компании, разрабатывающей месторождение, осуществляет контроль за состоянием многолетнемерзлых почв. Оценка изменений в тепловом состоянии почв в процессе строительства и эксплуатации основания свай проводится по результатам мониторинга. Для осуществления инженерно-геокриологического контроля при проектировании месторождения создаются инженерные системы мониторинга. В систему обустройства месторождения входят термоскважины с термокосами для мониторинга температурного режима почвы. Бурение скважин и установка в них оборудования для постоянного контроля температур под фундаментами осуществляется после расчистки трассы и до завершения ее отсыпки. Объектами исследований являются сооружения нефтегазодобывающей компании, расположенные на свайном фундаменте с залеганием фундамента на 0,8 и 11 м на всю глубину свай.

Полученные расчетные значения в Frost 3D в период с ноября 2021 по декабрь 2022 г. соотнесем с натуральными значениями моделируемого свайного фундамента на месторождении. Сопоставление расчетных и натуральных данных отражает разницу в значениях более чем в 42,57 %. Если рассмотреть значения ниже 4 м заглубления, сходимость составит в среднем 17,85 %. Эта неточность в данных на глубине от 0 до 4 м связана с особенностями расчетной модели, которая использует метод переменных направлений согласно схеме Дугласа – Рекфорда. Шаги пространственной сетки соответствуют расстояниям между узлами с определёнными индексами, что выдает другую картину тепло-

вого распределения. При тренировке данной расчетной модели с помощью коэффициента слоистости получилось довести сходимость до 9,86 %.

Актуальной задачей является решение проблемы теплового взаимодействия опоры трубопровода с вечной мерзлотой, которая может оказывать существенное влияние на состояние грунта. Это, в свою очередь, влияет на прочность и надежность трубопровода и может привести к авариям со значительными экономическими, материальными и экологическими последствиями. Один из способов ее решения – устройство теплоизоляции опор для уменьшения теплового воздействия на вечную мерзлоту. Сравнение результатов расчетов с аналогичными данными других исследователей [5, 6] подтверждает достоверность полученных прогнозов развития области оттаивания.

Для снижения теплового влияния на многолетнюю мерзлоту следует использовать теплоизоляцию для опор трубопровода. На основании результатов моделирования SolidWorks не учитывался тепловой поток перекачиваемой жидкости и трубопровода с изоляцией на многолетней мерзлоте, следовательно, нужно рассматривать только изоляцию опор. Влияние на глубину оттаивания вечной мерзлоты можно контролировать путем применения различных теплоизоляционных слоев на поверхности.

После проведения анализа экономической выгоды различных материалов для изоляции было выявлено, что наиболее перспективным вариантом является использование сверхтонкой жидкой изоляции. Она способна защитить опору трубопровода от солнечной радиации и таким образом оказывать тепловое воздействие на вечную мерзлоту. Неравномерное напряженно-деформированное состояние, вызванное различными климатическими факторами, особенно ярко выраженной сезонностью, приводит к необходимости прогнозирования температурного поля мерзлого грунта с учетом летних и зимних условий.

На текущем этапе выполнено моделирование опоры в условиях многолетней мерзлоты с использованием высокоэффективной жидкой теплоизоляции для уменьшения теплового воздействия на грунт. Более наглядными примерами являются показатели, собранные в мае, июне и сентябре, когда происходят процессы замерзания и оттаивания грунта и, как следствие, возникают геокриологические процессы, угрожающие инженерным конструкциям. Задача оценки надежности свайных фундаментов сформулирована следующим образом: предполагается, что конструкции устанавливаются на свайные фундаменты в условиях вечной мерзлоты и исключается влияние сил замораживания, т. к. оно незначительно:

$$P(t) = P \left| \begin{array}{l} F_u(\tau) \geq F_v(\tau) \\ Y_0(\tau) \leq Y_u \\ 0 \leq \tau \leq t \end{array} \right|.$$

Значение надежности свайного фундамента, обозначенное как $P(t)$, является безразмерной функцией. Несущая способность свайного фундамента F_u измеряется в Н, как и вертикальная нагрузка F_v , передаваемая на свайный фундамент. Горизонтальное смещение верха сваи под воздействием горизонтальных нагрузок обозначается как Y_0 и измеряется в метрах. Максимально допустимое горизонтальное смещение верха сваи, определенное прочностью

материала, обозначается как i и измеряется в метрах. Текущее время обозначается как t и измеряется в часах. В данном случае значение надежности P понимается как значение функции надежности [16] за период времени, равный сроку службы t_e . То есть $P = P(t_e)$.

Вероятностная теория – это раздел науки, изучающей случайные события и их вероятности. Она основана на математических моделях и статистических методах. Вероятностные теории широко применяются в различных областях, таких как физика, экономика, социология и др. Они дают возможность предсказывать и анализировать вероятности различных исходов. Изучение вероятностей позволяет более точно понять и объяснить случайные явления в мире. Вероятностная теория имеет свои основные понятия и принципы, такие как вероятностное пространство, события и случайные величины. Эти концепции помогают разработать стратегии и методы для решения проблем, связанных с вероятностными событиями. Вероятностная теория также связана с теорией статистики, которая используется для анализа данных и получения выводов:

$$F_u^* + \varphi(t) \geq F_v^* + \eta(t).$$

Математические ожидаемые значения несущей способности основания (F_u^*) и вертикальной нагрузки на основание (F_v^*) являются главными показателями в данном контексте. Стационарные случайные процессы $\varphi(t)$ и $\eta(t)$ также играют важную роль, имея нулевое математическое ожидаемое значение.

$$\gamma_u = \frac{F_u^* - F_v^*}{\sigma_\varphi} \frac{F_v^*}{F_u^*} = \frac{1 - \frac{F_v^*}{F_u^*}}{v_{Fu}}.$$

Рассчитывая характеристику безопасности по вертикальной нагрузке γ_v , можно использовать безразмерный коэффициент надежности фундамента F_u^* . Для расчета несущей способности подвесной сваи можно пренебречь несущей способностью конца и использовать следующее уравнение:

$$F_u^* = M \cdot R_{af}.$$

Определение значения M , которое представляет собой площадь боковой поверхности сваи в многолетнем мерзлом грунте, осуществляется с использованием формулы, аппроксимирующей данные из табл. 3 прил. 2 СНиП 2.02.04-88. Для определения расчетного сопротивления мерзлого грунта и грунтового раствора сдвигу по границе промерзания R_{af} используется формула, которая определена для известково-песчаного раствора:

$$R_{af} = k(0,27 + 1,5\sqrt{-T})10^5.$$

Для металлических свай коэффициент k , учитывающий неровность боковой поверхности, равен 0,7, а для железобетонных свай – 1,0. Эквивалентная температура грунта T в устоявшемся эксплуатационном состоянии определяет максимальную среднегодовую температуру на глубине заложения фундамента.

Затем, используя распределение Пуассона, определим количество выбросов из области допустимых состояний, вызванных вертикальной нагрузкой. Это обоснованно, поскольку нас интересуют только очень надежные си-

стемы, в которых выбросы являются редкими событиями, и их математическое ожидание в течение года определяется [16]:

$$v_{Fu} = \frac{0,9 \left(-\frac{T_0}{A} \right)^{1/3} \sigma \cdot D}{-2T - 0,47\sqrt{-T}}.$$

Для определения параметров грунта и его температурных колебаний в естественных условиях используются следующие переменные: T_0 – температура грунта на уровне годовых колебаний в естественных условиях, °С; A – амплитуда годовых колебаний наружной температуры, которая рассчитывается как разница между средними температурами самого теплого и самого холодного месяцев года, деленная на два. Обычно значение A составляет от 14 до 31 °С. Для определения степени разброса годовых температур используется стандартное отклонение σ , которое обычно находится в диапазоне от 0,4 до 1,7 °С. Также учитывается показатель затухания дисперсии температур с глубиной D , который зависит от типа фундамента и коэффициента

$$y = 0,019z\sqrt{C_f / \lambda_f}.$$

Для расчета значений T и D можно использовать формулы, представленные в работах Хрусталева, Голочваста и Пустовойта [16]. Значение z представляет собой глубину заложения фундамента от верхней границы многолетнего мерзлого грунта и измеряется в метрах. C_f обозначает теплоемкость многолетнего мерзлого грунта, Вт·ч/(м³·°С). Параметр λ_f отражает теплопроводность многолетнего мерзлого грунта, Вт/(м·°С).

$$\begin{aligned} T &= \alpha \cdot T_0, \\ \alpha &= 0,44\sqrt{y}, \\ D &= \begin{cases} \frac{[0,78 + 0,74 \ln(y)]}{y} & \text{при } y > 1; \\ 1 - 0,22y & \text{при } y \leq 1. \end{cases} \end{aligned}$$

Для стальных свай, где F_h представляет собой горизонтальную нагрузку на верхнюю часть сваи на уровне ростверка, H , I обозначает изгибаемый участок сваи, m ; EJ представляет собой жесткость сечения сваи, $H \cdot m^2$; Δ является параметром, учитывающим воздействие вертикальной нагрузки, m^{-1} ,

$EJ = E \frac{\pi}{64} (d_{out}^4 - d_{in}^4)$, где E – модуль упругости стали, Па; d_{out} , d_{in} – внешний и внутренний диаметры трубы, м,

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\frac{F_u}{EJ}}, \\ l &= L_0 + D_{th} + 1,5b. \end{aligned}$$

Вычисление прочности металлических трубчатых свай осуществляется путем определения левой части уравнения, где L_0 представляет собой высоту ростверка над поверхностью грунта, b – наибольшую сторону сечения призматической сваи или наружный диаметр сваи круглого сечения, а D_{ex} – глубина

ну сезонного промерзания грунта. Правая часть уравнения может быть выражена как Y_0 :

$$Y_0 = \frac{l^2}{6EJ} \frac{1 - \cos(\Delta l)}{\Delta \sin(\Delta l)} F_h(t).$$

Для свай из труб момент сопротивления сечения сваи, м^3 , обозначается как W , а предел текучести стали, Па , обозначается как σ_{fl} :

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{d_{out}^4 - d_{in}^4}{d_{out}}.$$

Второе условие в уравнении представляется в виде отношения между горизонтальными силами аналогично выражению для вертикальных сил, т. к. результат деления деформации на коэффициент G приводит к образованию силы, вызывающей эту деформацию. Затем с использованием аналогичных рассуждений для вертикальных сил мы получаем коэффициент безопасности для случая горизонтальной нагрузки:

$$\gamma_h = \frac{\frac{Y_u}{Y_0} - 1}{2v_{w \max}}.$$

Записываем аналогично для интенсивности отказов от действия горизонтальной нагрузки, где Y_0 – математическое ожидание горизонтального перемещения головы сваи в метрах:

$$m(\gamma_h) = \frac{\exp(-0,5\gamma_h^2)}{\gamma_h \sqrt{2\pi}}.$$

Из теории выбросов известно, что количество выбросов n является дискретной случайной величиной с интегральной функцией распределения $F(t, n)$.

Отсюда следует, что $P(t) = F_{Y(t, 0)}$. Для распределения Пуассона $F_{Y(t, 0)} = \exp[-\mu(t)]$, где $\mu(t)$ – математическое ожидание количества выбросов за период t . Предполагая, что выбросы из-за действия вертикальной и горизонтальной нагрузок являются независимыми случайными событиями, их количество можно считать аддитивной величиной. То есть количество выбросов за период t равно сумме выбросов из-за вертикальной и горизонтальной нагрузок за каждый год в промежутке времени от 0 до t :

$$\mu(t) = t[m(\gamma_h) + m(\gamma_u)],$$

где t – число лет. Учитывая вышесказанное, окончательно получим

$$P(t) = \exp[-\mu(t)].$$

Результаты расчета функции надежности свайного фундамента с учетом различной глубины заложения и наличия теплоизоляции приведены в табл. 3 и на рис. 8.

Как показало исследование, трехмерное компьютерное моделирование – мощный инструмент для количественной оценки криогенной опасности в районах вечной мерзлоты. Оно демонстрирует, что программа FROST 3D может быть использована для оценки степени оттаивания и промерзания грунта во-

круг сооружений при различных вариантах расположения фундаментов и теплового воздействия опор.

Таблица 3

Результаты расчета

Table 3

Calculation results

Вид	z – глубина заложения фундамента, м	P(t) – функция надежности свайного основания, безразмерная (б.р.)				D _{th} – глубина сезонного оттаивания грунта, м			
		Время, лет							
		1	2	3	4	1	2	3	4
Теплоизолированная опора с фундаментом на 0,8 м	0,8	0,994	0,988	0,984	0,978	1,39	1,52	1,62	1,69
Теплоизолированная опора с фундаментом на всю глубину	9	0,996	0,989	0,985	0,983	1,23	1,31	1,39	1,49
Опора с фундаментом на 0,8 м	0,8	0,993	0,986	0,98	0,971	2,21	2,38	2,49	2,59
Опора с фундаментом на всю глубину	9	0,993	0,988	0,981	0,978	2,029	2,13	2,19	2,29

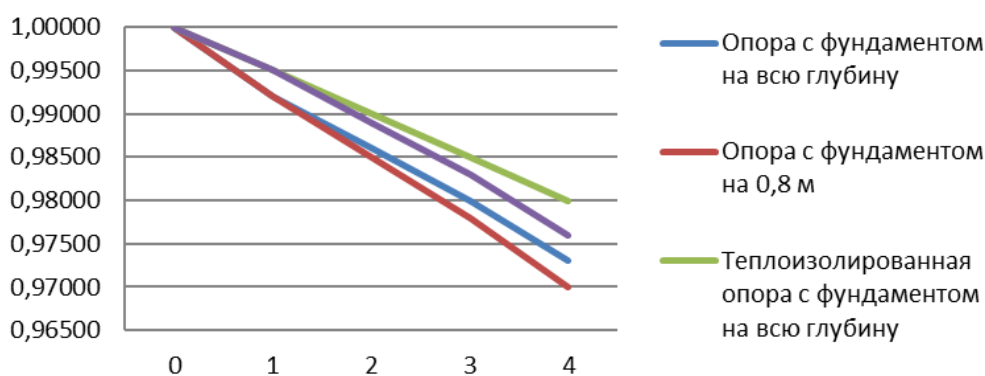


Рис. 8. Вероятности безотказной работы промышленного нефтепровода во времени

Fig. 8. Probabilities of accident-free pipeline operation over time

Выполненные вычисления позволили сделать следующие выводы:

1. Собственная частота и амплитуда колебаний фундамента при действии динамической нагрузки существенно зависят от массы грунта для свайных фундаментов небольшого размера.

2. В Арктической зоне Российской Федерации при строительстве фундаментов на мягких или бугристых грунтах необходимо учитывать вероятность оседания фундаментов и установленных на них конструкций под действием их собственного веса.

3. Для оценки надежности свайного фундамента на месторождении N было проведено опытно-промышленное испытание двухстоечной опоры после пяти лет эксплуатации с применением теплоизоляции. Результаты данного исследования показали, что надежность функции увеличилась на 4 %. Это свидетельствует об эффективности применения данного метода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media. 2013. 352 p. ISBN 978-1-4757-2292-5.
2. Ern A., Guermond J. Theory and practice of finite elements. Springer Science & Business Media. 2013. V. 159. 530 p.
3. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V., Vasilyev V.I. Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost // AIP Conference Proceedings, 2014. V. 1629. I. 1. P. 424–431. DOI: 10.1063/1.4902304
4. Hughes T.Jr. The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Courier Corporation, 2012. 704 p.
5. Logg A., Mardal K.-A., Wells G. Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book. Springer Science & Business Media, 2012. 732 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>
6. Meyer W.J. Concepts of mathematical modeling. Courier Corporation, 2012. 448 p.
7. Balay S., Brown J., Buschelman K. et al. PETSc Web page. 2011. URL: <http://www.mcs.anl.gov/petsc> (дата обращения: 16.12. 2022).
8. Pavlova N.V., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems // International Conference on Large-Scale Scientific Computing. Springer. 2013. P. 636–643.
9. Vabishchevich P.N. Time step for numerically solving parabolic problems // International Conference on Finite Difference Methods. Springer. 2014. P. 96–103.
10. Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V. Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils // Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. V. 7. № 2. P. 154–164.
11. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Степанов С.П. Математическое моделирование теплового режима железнодорожного полотна в условиях криолитозоны // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2013. Т. 10. № 5. С. 5–11.
12. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Степанов С.П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 10. С. 110–124.
13. Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А. Математическое моделирование распределения температурных полей // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 7. С. 3–27.
14. Мещерин И.В., Калмыков А.М., Сидняев Н.И., Федотов А.А., Храпов П.В. Задача определения температурного поля в мерзлых грунтах // Альманах современной науки и образования. 2012. № 7. С. 900–939.
15. Stepanov S.P., Sirditov I.K., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Numerical simulation of heat transfer of the pile foundations with permafrost // International Conference on Numerical Analysis and Its Applications. Springer. 2016. P. 625–632.
16. Голофаст С.Л., Влагова А.Ю. Влияние температурного поля трассы магистрального нефтепровода на прочностную надежность линейных участков // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 11. С. 24–33. DOI:10.24000/0409-2961-2019-11-24-33

REFERENCES

1. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science+Business Media, 2013. 352 p. ISBN 978-1-4757-2292-5.
2. Ern A., Guermond J. Theory and practice of finite elements. Vol. 159. Springer Science+Business Media, 2013. 530 p.
3. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V., Vasilyev V.I. Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost. *AIP Conference Proceedings*. 2014; 1629 (1): 424–431. DOI: 10.1063/1.4902304
4. Hughes T.J.R. The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis. Courier Corporation, 2012. 704 p.
5. Logg A., Mardal K.-A., Wells G. Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book. Springer Science+Business Media, 2012. 732 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>
6. Meyer W.J. Concepts of mathematical modeling. Courier Corporation, 2012. 448 p.
7. Balay S., Brown J., Buschelman K., et al. PETSc Web page. Available: www.mcs.anl.gov/petsc (accessed December 16, 2022)
8. Pavlova N.V., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems. In: *Proc. Int. Conf. 'Large-Scale Scientific Computing'*. Springer. 2013. Pp. 636–643.
9. Vabishchevich P.N. Time step for numerically solving parabolic problems. In: *Proc. Int. Conf. 'Finite Difference Methods'*. Springer. 2014. Pp. 96–103.
10. Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V. Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2015; 7 (2): 154–164.
11. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Stepanov S.P. Mathematical modeling of thermal regime of railway track in permafrost conditions. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. Ammosova*. 2013; 10 (5): 5–11. (In Russian)
12. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Stepanov S.P. Numerical modeling of temperature field of permafrost soil foundation of railway. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2016; 28 (10): 110–124. (In Russian)
13. Krylov D.A., Sidnyaev N.I., Fedotov A.A. Mathematical modeling of the distribution of temperature fields. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2013; 25 (7): 3–27. (In Russian)
14. Meshcherin I.V., Kalmykov A.M., Sidnyaev N.I., Fedotov A.A., Khrapov P.V. The problem of determining the temperature field in frozen soils. *Almanakh sovremennoi nauki i obrazovaniia*. 2012; (7): 900–939. (In Russian)
15. Stepanov S.P., Sirditov I.K., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Numerical simulation of heat transfer of the pile foundations with permafrost. In: *Proc. Int. Conf. 'Numerical Analysis and its Applications'*. Springer. 2016. Pp. 625–632. (In Russian)
16. Golofast S.L., Vladova A.Yu. Influence of temperature field of the main oil pipeline route on strength reliability of linear sections. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2019; (11): 24–33. DOI:10.24000/0409-2961-2019-11-24-33. (In Russian)

Сведения об авторах

Бурков Петр Владимирович, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

Волков Александр Эдуардович, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, A_E_Volkov@inbox.ru

Authors Details

Petr V. Burkov, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634003, Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634050, Tomsk, Russia; burkovpv@mail.ru

Aleksandr E. Volkov, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; A_E_Volkov@inbox.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 22.10.2023
Одобрена после рецензирования 05.11.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 11.10.2023
Approved after review 05.11.2023
Accepted for publication 09.11.2023

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. № 6. С. 169–182.

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 (6): 169–182.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.09.042.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-169-182

EDN: YDJOWA

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ БИСТАЛЬНЫХ БАЛОК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Андрей Владимирович Картопольцев

ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Современный уровень научно-технического прогресса позволяет создавать пролетные строения мостов из сталей различной прочности, обладающих высокой экономичностью и надежностью.

Процесс создания и эксплуатации мостов с бистальными (гибридными) пролетными строениями включает в себя различные этапы (от проектирования до эксплуатации), обеспечивающие необходимый уровень надежности. Таким образом, в результате проектирования, изготовления и строительства мостов с такими пролетными строениями формируется уровень надежности, который проявляется в процессе эксплуатации.

Цель. На основе предельных состояний для бистальных балок определить критерии безотказной работы за заданный срок службы, описать и сформировать некий целесообразный уровень надежности.

Результаты. С использованием вероятностных подходов и случайной природы нагружения рассмотрен способ оценки риска появления отказов в безопасной работе конструкции в зависимости от механизма взаимодействия элементов в сечении бистальных балок в процессе нагружения. Обсуждаются вопросы безопасности, риска, уровня надежности и живучести бистальных балок пролетных строений мостов.

Ключевые слова: мост, пролетные строения, бистальные балки, высокопрочные стали, надежность, отказы, безопасность

Для цитирования: Картопольцев А.В. Прогнозирование надежности бистальных балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 169–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-169-182. EDN: YDJOWA

ORIGINAL ARTICLE

RELIABILITY PREDICTION OF BRIDGE BISTEEL BEAMS

Andrei V. Kartopoltsev

ООО “DIAMOS”, Tomsk, Russia

Abstract. The scientific and technological progress makes it possible to create steel beams of various strength with high efficiency and reliability.

Purpose: The bridge construction and operation with bisteel (hybrid) beams include various stages of design to operation, providing the required level of reliability. As a result of design, manufacture and construction of bridges with such superstructures, the reliability is predicted, which manifests itself during the operation.

Research findings: The article determines the criteria for trouble-free operation for a given service life, describes and predicts the reliability level based on the limit state of bisteel beams. Using probabilistic approaches and the random nature of loading, the risk of failure is considered in safe operation of the structure, depending on the interaction between elements in the cross section of bisteel beams under loading. The issues of safety, risk, reliability, and survivability of bisteel beams are discussed.

Keywords: bridge, superstructures, bisteel beam, high-strength steels, reliability, failure, safety

For citation: Kartopoltsev A.V. Reliability prediction of bridge bisteel beams. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 169–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-169-182. EDN: YDJOWA

Отечественные нормы и правила в мостостроении являются более прогрессивными и обоснованными по сравнению с зарубежными, т. к. допускают в бистальных балках не только развитие пластических деформаций, но и регулирование их для повышения надежности конструкций пролетного строения, делая тем самым процесс прогнозирования надежности объективным и устойчивым.

Распространение упругопластических деформаций при длительном нагружении в течение нормативного срока эксплуатации способствует сохранению требуемых параметров надежности сооружения. Следует отметить, что при оценке надежности моностальных и бистальных несущих элементов пролетных строений мостов величина ограниченной пластической деформации в условиях динамических нагрузок составляет $\cong 0,1 \%$, что практически в два раза меньше аналогичных деформаций при статическом нагружении [1]. Также учёт пластических деформаций в бистальных балках при прогнозировании надежности позволяет рассматривать проявления прочностных свойств сталей в сечении несущих балок пролетных строений с использованием коэффициента эффективности материала [2]. При пластической деформации $\varepsilon_{пл} = 0,006$ коэффициент эффективности работы стали равен 0,642, а при $\varepsilon_{пл} = 0,01$ ко-

коэффициент равен 0,71. Таким образом, пластические деформации в размере 0,0004 повышают эффективность использования стали в сечении на 10 %. В этом случае целесообразно вариант прогнозирования надежности из условия воздействия предельной (разрушающей), а в отдельных случаях резонансной нагрузки рассматривать функцией средней величины предела текучести стали элементов бистальных балок [3].

Для моностальных и бистальных конструкций балок возможны два гарантированных случая по условиям прочности: вертикальная стенка двутаврового сечения в контакте у нижнего пояса достигает предела текучести, нижний пояс при этом испытывает упругие деформации $R_{st} = \sigma_T^{st} < R_n$. Стенка и нижний пояс испытывают ограниченные пластические деформации при условии $R_{st} < \sigma_T^{st}$; $\sigma_n^H \geq R_n = \sigma_T^n$. Гарантированный предел текучести стали для обоих элементов бистальных балок при оценке надежности подчиняется закону распределения:

$$R_T = R_y - \gamma \cdot S, \quad (1)$$

где R_y – основное расчетное сопротивление стали, равное $R_{yn} \frac{1}{\gamma_m} \frac{1}{\gamma_n}$; γ – коэффициент безопасности; S – дисперсия величины среднего предела текучести стали в сечении; R_{yn} – расчетное сопротивление стали пояса в зависимости от упругопластического состояния; $\frac{1}{\gamma_m}$ – коэффициент рассеяния надежности материала; $\frac{1}{\gamma_n}$ – коэффициент рассеяния однородности стали; при $\gamma_n = 1,11$, $\gamma_m = 0,9 \cong \gamma_c$ – коэффициенту условия работы стали в сечении.

Для бистальных балок с коэффициентом обеспеченности $\rho = 0,95$ и $\gamma = 1,64$ имеем:

$$R_t = \frac{(R_y - 1,64S)}{K}, \quad (2)$$

где K – нормативное значение коэффициента безопасности для стальных конструкций мостов [3].

В этом случае использованием гарантированного предела текучести стали в сечении бистальных балок повышается уровень максимальной напряженности наиболее нагруженного элемента сечения, например нижнего пояса бистальной балки, выполненного из стали более высокого класса по отношению к стенке из стали менее прочной марки, в среднем на 5–9 %. При условии, что среднеквадратичное отклонение напряжения текучести с вероятностью 0,99 для истинного предела текучести соответствует равенству вида [4, 5]:

$$\sigma_T = \alpha_{cp} \mp 3\sigma_s, \quad (3)$$

где σ_s – среднеквадратичное отклонение; $\frac{\alpha_{cp} - 3\sigma_s}{R_{yn}}$ – обобщенная характеристика однородности стали.

Рассеяние механических характеристик системы упругопластического деформирования оценивается выражением

$$\frac{1}{\gamma_m} = \frac{\alpha_{cp} - 3\sigma_s}{R_{yn}}. \quad (4)$$

Тогда для геометрических параметров сечения $\frac{1}{\gamma_n}$ будет равно $\frac{\alpha_{cp} + 3\sigma_s}{R_{yn}}$.

В процессе прогнозирования надежности бистальных балок необходимо найти вероятность зависимости прочности материала элементов балки и соотношения их высот упругой и пластической зоны деформированного сечения в виде коэффициента учета развития упругопластических деформаций – C_g . Для бистальных балок двутаврового и коробчатого сечений значение C_g может определяться по эмпирической формуле [6]. В этом случае надежность балок целесообразно рассматривать не в какой-то определенный момент времени эксплуатации ($t-t_0$), а прогнозируя на нормативный срок службы или до истощения служебного ресурса. Эта задача решается методом имитационного моделирования, в котором можно описать предельное состояние как отдельных элементов пролетного строения, так и конструкции в целом с учетом перехода из одного деформированного состояния в другое, имитируя тем самым воздействие одной единицы или группы транспортных средств в виде случайного транспортного потока. Применение имитационного моделирования воздействия нагрузки в качестве отображения изменения состояния системы «пролетное строение – автомобиль» в течение времени определяется в конечном итоге предельным состоянием [7, 8].

Использование методов теории вероятности в теории надежности бистальных конструкций базируется на принципах концепции статистического предельного состояния, отображающего закон распределения в виде

$$R_i \geq (1 + \beta \cdot A_Q) \bar{Q}, \quad (5)$$

где \bar{Q} – среднее значение нагруженности; A_Q – параметр изменчивости нагруженности; β – коэффициент аперидичности воздействия временной нагрузки в функции $f(\alpha, V)$; $\alpha = 0,12$; V – вероятность возникновения предельного состояния по параметрам напряженно-деформированного поведения балки с реальными характеристиками прочности при коэффициентах надежности для стали 16 Д – 1,09, 15ХСНД – 1,165, 10ХСНД – 1,125. Тогда уровень надежности бистальных балок по предельному состоянию будет прогнозироваться в зависимости от воздействия на пролетное строение спектра всех видов нагрузок, представляющих квазигармоничный случайный процесс, развернутый во времени [9, 10, 11].

Для однотипных мостовых сооружений, возводимых и эксплуатируемых в одинаковых условиях, выход из строя всего сооружения и отдельных элементов пролетного строения происходит в различные случайные отрезки времени. Основным аргументом в теории вероятности в этом случае являются данные математической статистики, накопленные за период эксплуатации. Значит, уровень надежности мостовых конструкций должен устанавливаться

уже на стадии проектирования с обоснованием процедуры нормирования расчетных и перспективных характеристик надежности.

Как известно, вероятность разрушения моста или его отдельных элементов связана с вычислением характеристик его безопасности, а также с глубоким изучением воздействия всех типов нагрузок в качестве элементов случайного события. Пусть, например, из каждой системы действующих нагрузок на пролетное строение моста возможно превышение допустимых значений амплитуды прогибов (А) 35 % – из-за работы балок за пределом упругости в связи с перегрузом; (В) 28 % – за счет изменения режима нагруженности и остальные – по технологическим причинам (С). Вероятность отступления работы пролетного строения от нормативной будет: $1 - (0,20 + 0,35 + 0,28) = 0,17$.

Вероятность существования такого события выражаем в математическом виде:

$$P(c) = \sum_{i=1}^n P(B / A) P(A). \quad (6)$$

Таким образом, отмечается адекватность этого события, представляемого формулой (6), как известным выражением Байеса:

$$P(c) = \frac{P(A)P(B / A)}{\sum_{i=1}^n P(A)P(B / A)}. \quad (7)$$

Если представить плотность распределения такой вероятности $P(c)$ графически (рис. 1, 2), то математический закон дифференциальной функции представим в виде

$$P(x) = P(c) = dP(x)dx, \quad (8)$$

где $P(c)$ – плотность распределения случайных величин с адекватной плотностью вероятности по нагрузке [11].

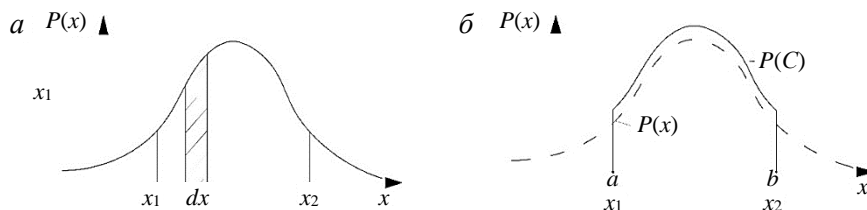


Рис. 1. Плотность распределения:

а – функции $P(x)$; б – функции $P(x)$ и $P(C)$

Fig. 1. Density distribution:

а – function $P(x)$; б – functions $P(x)$ and $P(C)$

При $P(x) = P(C)$ справедливо выражение в виде

$$P(x) = P(C) = \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - x_1)^2}{2\sigma^2(x)} \right], \quad (9)$$

где x – математическое ожидание; $\sigma(x)$ – стандарт кривой распределения.

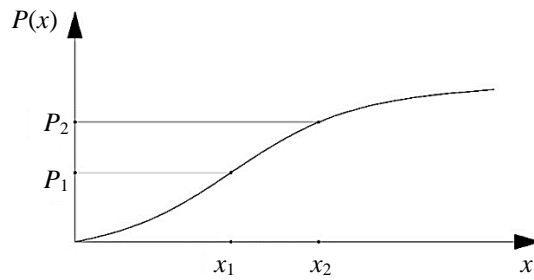


Рис. 2. График функции распределения непрерывной случайной величины
Fig. 2. Distribution function of continuous random variable

Равенство $P(x) = P(C)$ справедливо, когда в течение всего срока службы пролетного строения моста нагрузки, действующие на конструкцию, а также их характеристики не превышают нормативный допустимый предел (рис. 3).

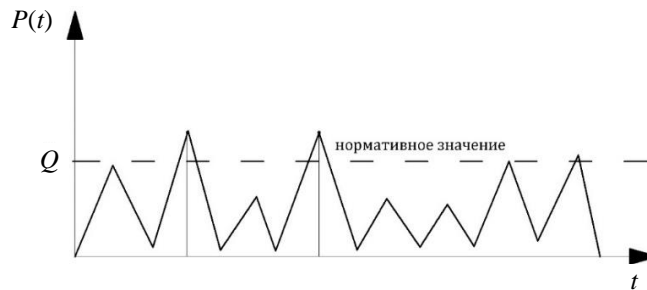


Рис. 3. График возможных случайных выбросов
Fig. 3. Possible overshoot of a random function

В случае возможных выбросов случайной функции, перемещений за заданный уровень нормативного значения, например, нагрузки Q , вероятность события представляется выражением

$$Q(t) = dt \int_0^{\infty} P_x(x/t) dx, \quad (10)$$

где $x(t) = \frac{dx(t)}{dt}$; P_x – плотность распределения $x(t)$.

Поделив вероятность выбросов $Q(t)$ на dt , определим среднее число выбросов за период времени t . Считая выбросы независимыми, редкими, случайными событиями и принимая их проявление по закону Пуассона, формулу для определения вероятности того, что в течение времени t не произойдет ни одного выброса за предел нормативных величин, можно представить в следующем виде:

$$P(t) = P(x) = \exp[-g(t)], \quad (11)$$

где $g(t) = \int_0^{\infty} P(x/t) x dt$.

Бистальные балки пролетных строений мостов с различной вариацией несущей способности элементов сечения в зависимости от вида предельного состояния и нагруженности следует рассматривать в рамках только структурной надежности, характеризуемой средним коэффициентом запаса $K_s = m_R / m_g$ и коэффициентами вариации предельного состояния $V_R = \frac{\sigma_R}{m_R}$, принимаемыми из условия вероятности безотказной работы. Следующие значения: σ_q , σ_R – стандарты распределения соответственно структурных параметров и несущей способности в элементах сечения бистальной балки; m_R , m_g – среднее значение соответственно динамической несущей способности и нагрузки.

Рассматривая разновидности поэлементного предельного состояния сечения бистальных балок, например, по материалу вертикальной стенки, выполненной из менее прочной, чем пояс, стали, или по материалу нижнего пояса из высокопрочной стали, значения m_q , σ_q следует определять по рекомендации проф. А.А. Потапкина в виде

$$\left. \begin{aligned} m_g &= \int_g^H \frac{\gamma - \gamma_n \cdot \gamma_f}{\gamma - \gamma_n} \\ \sigma_q &= \int_g^H \frac{\gamma_f - 1}{\gamma - \gamma_n} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где $\int_g^H \frac{\gamma - \gamma_n \cdot \gamma_f}{\gamma - \gamma_n}$ – нормативное значение нагрузки; γ – число стандартов воздействия расчетной нагрузки; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке; γ_n – число стандартов для нормативной нагрузки.

Структурная надежность бистальных балок рассматривается как двухуровневая система, в зависимости от конструктивного состояния (рис. 4) [12]. Для первого уровня системы с бистальными балками значения $m_{\bar{R}}$ и m_g равны:

$$\left. \begin{aligned} m_R &= m_1 - 3,34(1 - n^{-0,266})\sigma_1 \\ m_R &= n^{-0,266} \cdot \sigma_1 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Для балок второго уровня значения m_R и m_g следующие:

$$\left. \begin{aligned} m_R &= \sum_i^n m_i \\ \bar{\sigma}m_R &= \sum_{i=1}^n (\sigma_i^2) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где m_1 , σ_1 – среднее значение и стандарт напряжённо-деформированного состояния для наиболее нагруженного одного элемента сечения балки или од-

ной конструкции, состоящей из n элементов в сечении. Например, для бистальной балки двутаврового сечения, состоящей из 3 элементов, наиболее нагруженной является вертикальная стенка ($n = 1$). Для бистальной балки из трех блоков, один из которых состоит из трех элементов, наиболее нагружен блок ПП ($n = 3$) (рис. 4).

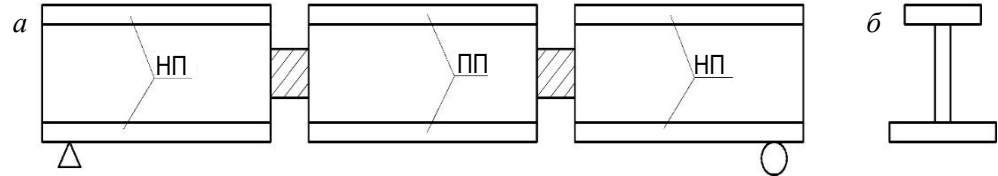


Рис. 4. Схема бистальной балки 1-го уровня:

a – НП – сталь нормальной прочности (16Д); ПП – сталь повышенной прочности (15ХСНД); b – сечение бистальной балки

Fig. 4. Diagram of the 1st level bisteel beam:

a – normal (16D) – high (15KhSND) – normal strength steel; b – cross-section

При линейаризации функции процесса деформирования бистальных балок формулы (12), (13) упрощаются и имеют вид

$$\left. \begin{aligned} m_R &= R_i \frac{\gamma - \gamma_n / \gamma_m}{\gamma - \gamma_n} \\ \bar{\sigma}_R &= R_i \frac{1 - 1 / \gamma_m}{\gamma - \gamma_n} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где $R_i = \sigma_T^{\text{CT}}$ – для бистальных балок первого уровня; $R_i = R_n$ – для бистальных балок второго уровня; σ_T^{CT} – предел текучести стали вертикальной стенки; R_n – расчетное сопротивление стали пояса.

Бистальные балки с элементами из стали различной прочности, а также в условиях упругопластического деформирования с остаточной деформацией 0,01 % рассматриваются как сложные системные конструкции, обладающие коэффициентом системности K_c , равным

$$K_c = \left[\sum_i^n A_i (R_i + 3\sigma_i) - 3 \sqrt{\sum_i^n (\sigma_i \cdot A_i)^2} \right] / \sum_i^n A_i \cdot R_i, \quad (16)$$

где R_i , A_i – расчетное предельное сопротивление материала, площадь элемента сечения, площадь i -й части сечения; σ_i – стандарт плотности распределения для i -го расчетного предельного сопротивления. Таким образом, структурная надежность всей бистальной балки не должна быть ниже структурной надежности наиболее нагруженного элемента сечения [13]. По статистическим данным, при нагружении с коэффициентом вариации $V_R = \bar{V}_g = 0,1$ и $K_c = 1,3$, $\frac{R_n}{\sigma_{m.\text{CT}}} = 2$ параметры структурной надежности определяются по формуле (12).

Рассмотрим бистальные балки 1^{го} уровня при анализе структурной надежности как систему аппроксимируемых условий изгибаемых звеньев (элементов) с определенной взаимосвязанностью и соподчиненных (иерархией) при восприятии нагрузок, которые должны быть связаны друг с другом граничными условиями (рис. 4) [14].

Бистальная балка в надежном смысле состоит из элементов, в которых отказ нескольких или одного элемента приводит к функциональному отказу всей балки. В зависимости от вида предельного состояния разрушение происходит по наиболее слабому звену, выход из строя которого будет соответствовать выходу из строя всей балки. В этом случае вероятность неразрушения бистальной балки запишется в виде

$$P_{Si}(g) = 1 - P_{Ci}(g), \quad (17)$$

где $P_{Si}(g) = [1 - P_{Ci}(g)]^n$ – вероятность того, что при нагрузке g произойдет разрушение хотя бы одного элемента балки или выход его за предельное состояние. Ввиду того, что прочность каждого элемента балки является независимой случайной величиной, справедливо выражение

$$P_S(g) = [1 - P_{Ci}(g)]^n, \quad (18)$$

где n – количество элементов в системе.

В упругой стадии при одинаковых напряжениях и плотности распределения механических характеристик стали в элементах балки (рис. 5, 6) плотность вероятности распределения прочности будет записана в виде [15]:

$$S_i = N[1 - P_{Ci}(g)]^{n-1} P_S(g), \quad (19)$$

где $P_S(g) = \frac{dP_{Ci}(g)}{dg}$.

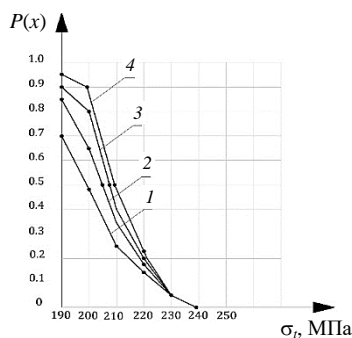


Рис. 5. График зависимости вероятности предельных оценочных свойств стали НП (16Д) от среднего значения результатов испытания для балки 2-го уровня

Fig. 5. Dependence between probability of ultimate evaluation properties of normal strength steel and average test values of 2nd level beam

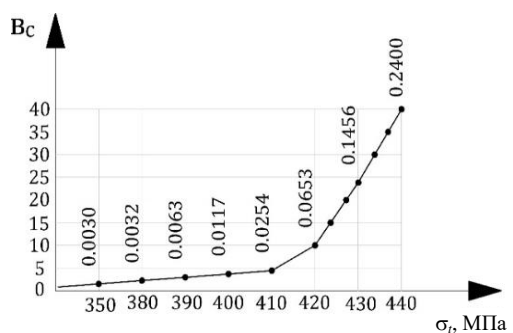


Рис. 6. Экспериментальная плотность распределения предела текучести сталей нормальной, повышенной и высокой прочности (НП 15ХСНД, ВП 10ХСНД) для балок 1-го уровня

Fig. 6. Experimental density of yield strength distribution of normal, higher and highest strength steel (15KhSND, 10KhSND) for 1st level beams

Например, для бистальной балки (см. рис. 4) в случае, когда прочность элементов характеризуется упругой стадией работы и подчиняется нормальному закону распределения при индексе надежности $\beta = 2$, $P_{Ci} = 0,99$ и $n = 3$, значение $P_s(g) = 1 - \sqrt[3]{0,99} = 0,93$.

Таким образом, надежность бистальной балки ниже надежности элемента. Принимая усилия в звеньях балки неодинаковыми или пропорциональными максимальным изгибающим моментам от воздействия суммарной нагрузки, надежность сплошной балки длиной L будет определяться:

$$P_s = \exp \left[- \int_0^L l_i \left[M_g^i(x) \right] dx \right], \quad (20)$$

где $l_i \left[M_g^i(x) \right]$ – погонная интенсивность отказов, равная $\frac{P_{si}(g) \left[M_g^i(x) \right]}{L}$;

$M_g^i(x)$ – изгибающий момент суммарной нагрузки интенсивностью g , равной

$M_g^i(x) = \frac{\sigma_g^T \cdot m}{n} W$; $m = 0,9$ – коэффициент условия работы; $n = 1,4$ – коэффициент нагрузки; W – момент сопротивления сечения.

Тогда вероятность отказа бистальной балки 1-го уровня возможна при условии

$$P_{st} = \frac{1}{2L} - \frac{1}{L} \sum_0^L \beta \left[\frac{M_g^i(x) - \bar{M}_p}{S^{\sigma R_1}} \right], \quad (21)$$

где $S^{\sigma R_1}$ – коэффициент вариации предельного состояния; $\bar{M}_p = \frac{\sigma_T \cdot m}{n}$.

Для бистальных балок 2-го уровня (рис. 7) снижение предельного напряжения в одном элементе способствует возможности выхода оставшихся элементов балки за предел «исправных», а также может повлечь за собой выход всей балки за границу нормального состояния.

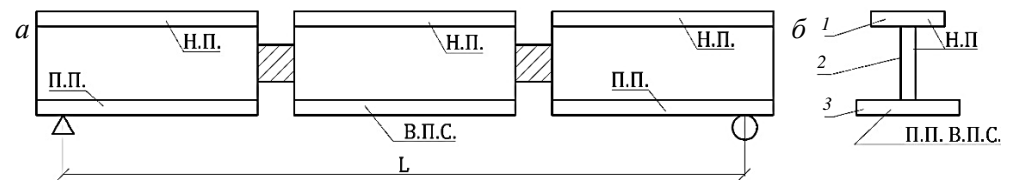


Рис. 7. Расчетная схема бистальной балки:

1 – верхний пояс балки; 2 – вертикальная стенка; 3 – нижний пояс

Fig. 7. Design scheme of basteel beam:

1 – upper grid; 2 – vertical wall; 3 – lower grid

В отличие от бистальных балок 1-го уровня, вероятность разрушения в балках 2-го уровня рассматривается на уровне отказа наиболее уязвимого элемента, каким является вертикальная стенка, где на контакте с нижним поя-

сом напряжения равны пределу текучести для стали нормальной прочности $\sigma_p = \sigma_T$ с коэффициентом вариации $\gamma = 0,06-0,12$. Обозначая вероятность разрушения одного элемента – вертикальной стенки – через $P_s(g)$, вероятность разрушения звена бистальной балки, состоящей из трех элементов ($n = 3$), следует выразить формулой

$$P_{Si}(g) = \frac{2P_s^3(g)}{3} - \frac{P_s^3(g)}{2}. \quad (22)$$

Для бистальных балок обоих уровней воздействия суммарной нагрузки, состоящей из совместного действия нескольких нагрузок типа $Q_{вр1}(t)$, $Q_{вр2}(t) \dots Q_{врn}(t)$, условие безотказной работы определится выражением [16]:

$$a_1 P_{вр1}(t) + a_2 P_{вр2}(t) + \dots + a_n P_{врn}(t) \leq R, \quad (23)$$

где $R = R_n$ – для балок 1-го уровня; $R = \sigma_T^{CT}$ – для балок 2-го уровня; a_1, a_2, a_n – коэффициенты формы сечения балок: двутаврового и коробчатого сечения – 2–4, прямоугольного – 0,833, круглого – 1,133.

В этом случае при расчетах надежности и несущей способности следует вводить коэффициенты сочетания в зависимости от количества воздействий [17]. Для первого приближения при воздействии на пролетные строения одного или двух видов нагрузок коэффициент составит $n_c \cong 0,9-0,95$, при воздействии двух и более нагрузок $n_c \cong 0,7-0,8$.

При воздействии на пролетное строение моста одиночных и нескольких сверхнормативных или сверхрасчетных нагрузок коэффициент составит $n_c \cong 0,8$ [18, 19]. Введение численных значений коэффициентов сочетания не имеет строго нормативного обоснования и основано на результатах длительной диагностики на мостах, поэтому нуждается в дальнейшем подтверждении. В условиях воздействия случайных разнотипных нагрузок и введения в расчеты коэффициента сочетания n_c выражение (23) перепишем в виде [20]:

$$n_c a_1 P_{вр1}(t) + a_2 P_{вр2}(t) + \dots + a_n P_{врn}(t) \leq R_S, \quad (24)$$

где R_S – предельное значение расчетного сопротивления материала балки по несущей способности. Тогда предельное значение (эталон) случайной нагрузки будет равен

$$P_{врi}(t) = \frac{48\sigma_g^T \cdot m \cdot W(1-\alpha^2)}{n \cdot \pi^2 L \cdot \alpha^2 \sin\left(\frac{2\pi\alpha t}{T} - \frac{\alpha}{1-\alpha^2}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}, \quad (25)$$

где t – время движения нагрузки по мосту, с; L – длина пролета, м; $\alpha = 0,0039V$; V – скорость движения по балке, м/с; T – период собственных

колебаний, с; $T = -2\pi \sqrt{\frac{M_g^i(x)}{\kappa_g}}$; $\kappa_g = 48EI/l^3$ – коэффициент комплексной жесткости сечения балки.

Вероятность безотказной работы бистальной балки пролетного строения будет обеспечена при условии

$$P_{\text{вр}} \leq \frac{P_{\text{впр}}(t)}{nc}, \quad (26)$$

где $P_{\text{вр}}$ – равнодействующая по Винклеру сила воздействия нагрузки на пролетное строение.

Выводы

Таким образом, следует отметить, что затронутые в статье параметры вероятности отказа, т. е. вероятность реализации предельного состояния в наиболее нагруженном слое для бистальных балок, достаточно малы для статистики определенных систем, и выход из строя (отказ) хотя бы одного элемента уже является сигналом опасности или началом его частичного разрушения.

Представленные формулы оценки надежности бистальных балок не характеризуют в полной мере возможности мгновенного разрушения. Рассмотренные примеры и формулы, по сути, показывают важность вероятностных методов оценки несущей способности и надежности конструкций и являются основой вычисления вероятности отказа при решении ряда задач надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Разработка перспективных гибридных конструкций пролетных строений мостов из сталей различной прочности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 3. С. 171–182.
2. Картопольцев В.М., Бондарюк В., Боровиков А.Г. Некоторые аспекты нелинейной теории изгиба бистальных балок. Ростов-на-Дону, 1987. С. 43–52.
3. Гвоздев А.А., Маратян С.А., Сегалов А.Е. Об учете совместной работы упругопластичных элементов в конструкции // СМРС. 1978. № 5. С. 1–4.
4. Картопольцев В.М. Применение бистальных балок в пролетных строениях автодорожных мостов : специальность 05.23.15 «Мосты и транспортные тоннели» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ленинград, 1991. 33 с.
5. Кочев Б.В. О вероятностном обосновании коэффициента учета развития пластических деформаций // Совершенствование расчета металлических конструкций в упругопластической стадии : тезисы докладов научно-технической конференции. 15 ноября. Свердловск, 1983. С. 11–12.
6. Raizer V.D. Reliability of structural analysis and applications. Backbone Publishing Company. New York, USA, 2009. 146 p.
7. Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В. Техническая вибродиагностика пролетных строений мостов // Акустика речи, медицинская и биологическая акустика, архитектурная и строительная акустика, шумные вибрации, аэроакустика : сб. трудов XX сессии Российского акустического общества. Т. 3. Москва : ГЕОС, 2008. С. 228–233.
8. Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л. Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов. Ленинград, 1989. 96 с.
9. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу прогнозирования динамической надежности пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 6. С. 170–181. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181
10. Ditlevson O., Madsen H.O. Structural reliability methods. NY, Willey and Sons, 1996. 369 p. ISBN 0471960861.
11. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Киев : Изд-во УкрНИИПроектстальконструкция, 1999. 210 с.

12. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1986. 180 с.
13. Знаменский Е.М., Сухов Ю.Д. О расчетах конструкций с заданным уровнем надежности // СМРС. 1962. № 2. С. 7–9.
14. Takaoka N., Shirak W. Reliability analysis of Structural members composed of several random processes // International Journal of Mechanics Structural. 1984. 1212. P. 151–180.
15. Гумбель Э. Статистика экспериментальных значений. Москва : Мир, 1965. 449 с.
16. Федотов Е.И., Лоцикая К.С. О выборе коэффициента сочетания нагрузок // СМРС. 1980. № 1. С. 18–21.
17. Rackwitz R. Time aspects in applying the life genality inder to structural safety rebiality and optimization of structural systems. Balrena Puble. 2003. P. 249–259. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203740965>
18. Громацкий В.А. О методах назначения контрольных нагрузок и оценке надежности по результатам испытаний // СМРС. 1984. № 5. С. 7–10.
19. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. Москва : Наука, 1984. 268 с.
20. Крамер Г., Лидбеттер М. Стационарные случайные процессы. Москва : Мир, 1969. 398 с.

REFERENCES

1. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V. Hybrid design of bridge span structures made of different strength steel. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; (3): 171–182. (In Russian)
2. Kartopoltsev V.M., Bondaryuk V., Borovikov A.G. Some aspects of nonlinear bending theory of bisteel beams. Rostov-on-Don, 1987, Pp. 43–52. (In Russian)
3. Gvozdev A.A., Maratyan S.A., Segalov A.E. Consideration of joint work of elastic-plastic elements in a structure. *SMRS*. 1978; (5): 1–4. (In Russian)
4. Kartopoltsev V.M. Application of bisteel beams in roadway spans. DSc Abstract. Leningrad, 1991. 33 p. (In Russian)
5. Kochev B.V. Probabilistic justification of plastic deformation development. In: *Proc. Sci. Conf. 'Calculation Improvement of Metallic Structures at Elastoplastic Stage'*. Sverdlovsk, 1983. Pp. 11–12. (In Russian)
6. Raizer V.D. Reliability of structural analysis and applications. Backbone Publishing Company. Nev York, USA, 2009. 146 p.
7. Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V. Technical vibration diagnostics of bridge spans. In: *Proc. 20th Meeting of Russ. Acoustic Community 'Speech Acoustics, Medical and Biological Acoustics, Architectural and Construction Acoustics, Noisy Vibrations, Aeroacoustics'*. Vol. 3. Mocsow: GEOS, 2008. Pp. 228–233. (In Russian)
8. Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shajkevich V.L. Prediction of structural reliability of steel and steel-reinforced concrete bridges. Leningrad, 1989. 96 p. (In Russian)
9. Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V., Alekseev A.A. Towards predicting dynamic reliability of bridge spans. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (6): 170–181. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181 (In Russian)
10. Ditlevson O., Madsen H.O. Structural reliability methods. New York: Willey and Sons, 1996. 369 p. ISBN 0471960861.
11. Perel'muter A.V. Selected problems of reliability and safety of building structures. Kiev, 1999. 210 p. (In Russian)
12. Rajzer V.D. Methods of reliability theory in problems of design parameter normalization of buildings. Moscow: Strojizdat, 1986. 180 p. (In Russian)
13. Znamenskij E.M., Suhov Yu.D. Structural analysis at a given level of reliability. *SMRS*. 1962; (2): 7–9. (In Russian)
14. Takaoka N., Shirak W. Reliability analysis of Structural members composed of several random processes. *International Journal of Mechanics Structural*. 1984; (1212): 151–180.
15. Gumbel' E. Statistics of experimental values. Moscow: Mir, 1965. 449 p. (In Russian)
16. Fedotov E.I., Losickaya K.S. Selection of load combination factor. *SMRS*. 1980; (1): 18–21. (In Russian)

17. Rackwitz R. Time aspects in applying the life geniality to structural safety. *Reliability and Optimization of Structural Systems*. 2003; 249–259. <https://doi.org/10.1201/978020374096518>.
18. Gromackij V.A. Methods of assigning test loads and reliability based on test results. *SMRS*. 1984; (5): 7–10. (In Russian)
19. Zaslavskij G.M. Stochasticity of dynamic systems. Moscow: Nauka, 1984. 268 p. (In Russian)
20. Kramer G., Lidbetter M. Stationary random processes. Moscow: Mir, 1969. 398 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Author Details

Andrei V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.11.2023
Одобрена после рецензирования 09.11.2023
Принята к публикации 10.11.2023

Submitted for publication 06.11.2023
Approved after review 09.11.2023
Accepted for publication 10.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 183–195.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 183–195.

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

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.072-027.45

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-183-195

EDN: XACQYX

К ВОПРОСУ НАДЕЖНОСТИ НЕСУЩИХ БАЛОК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ 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.* В качестве одного из критериев оценки надежности несущих элементов пролетных строений мостов рассматриваются пиковые значения величин временной подвижной нагрузки, возникающие в отдельные короткие промежутки времени и значительно превышающие нормативный уровень нагружения.

Пиковые нагрузки интерпретируются как непрерывный случайный процесс в виде случайной последовательности некоторых импульсов, проявляющихся через случайный промежуток времени t_i и обладающих случайной длительностью во времени Δt_i .

Цель. В статье предпринята попытка представить изменения временных подвижных нагрузок во времени в виде простого пуассоновского потока, где события, моменты появления нагрузки на пролетном строении моста независимы между собой, а периоды повторяемости и продолжительности действия случайной нагрузки представляются независимыми случайными величинами.

Результаты. При заданном нормативном сроке службы мостов авторами рассмотрены три случая в обеспечении и определении достаточно малого значения вероятности появления разрушающей или близкой к ней одной или группы временных подвижных нагрузок в течение определенного срока. Исходя из видов отказов определено среднее время безотказной работы пролетного строения моста, а также время наработки на возможный отказ при длительном или конкретном превышении значения нагрузки.

Ключевые слова: мост, надежность, вероятность, прочность, временная подвижная нагрузка, пиковые нагрузки, случайный процесс, отказ, пролетное строение

Для цитирования: Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу надежности несущих балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-183-195. EDN: XACQYX

ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS RELIABILITY OF LOAD-BEARING BEAMS OF BRIDGES

Vladimir M. Kartopoltsev¹, Audrey V. Kartopoltsev¹,
Aleksandr A. Alekseev²

¹ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

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

Abstract. One of the criteria for assessing the reliability of load-bearing elements of bridges, are peak values of the temporary mobile load significantly exceeding the standard level of loading. Peak loads are interpreted as a continuous random process in the form of a random pulse sequence manifested after a random period of time and having a random duration.

Purpose: The aim of the paper is to show changes in temporary mobile load over time in the form of a simple Poissonian flow, where the bridge load is independent, and repeatability and duration of the random load are independent random variables.

Research findings: Three cases are considered to determine sufficiently low probability of destructive temporary mobile loads during the given normative service life of bridges. Based on the failure types, the average failure-free operation of the beam is determined as well as the operating time for a possible failure with a prolonged or specific excess load.

Keywords: bridge, reliability, probability, strength, temporary mobile load, peak load, random process, failure, beam

For citation: Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Alekseev A.A. Towards reliability of load-bearing beams of bridges. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-183-195. EDN: XACQYX

В настоящей статье впервые представляется возможность оценить надежность балок мостов по пиковым значениям воздействия временной подвижной нагрузки на основе теории вероятности и математической статистики.

Принимая воздействие нагрузки переменным с длительным превышением пиковых значений и вызывающим значительные ускорения и изменчивость во времени, авторы работ [1, 2, 3] рассмотрели плотность вероятности опасных или безопасных отказов в усеченном виде. Переменное воздействие оказывает влияние на конструкции пролетного строения в течение всего периода эксплуатации, значительно меньшего, чем нормативный срок службы. Тогда, рассматривая гармонические колебания балок пролетных строений мостов основного тона как нестационарный процесс нагружения (рис. 1), вероятность безотказной работы или надежность пролетного строения следует определять из формулы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(i) dt} = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}, \quad (1)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность возможных отказов несущих элементов пролетного строения за промежуток времени t , равная $n \cdot \lambda(i)$; n – количество элементов в балке; $\lambda(i) = \frac{1}{T}$; T – нормативный срок службы пролетного строения моста;

$t_{\text{ср}}$ – среднее время между отказами; t – время эксплуатации. Для металлических пролетных строений $T = 50$ лет; тогда $\lambda(i) = 0,016$ лет, а $\lambda = 0,048$. Таким образом, надежность элементов балки ниже надежности всей балки.

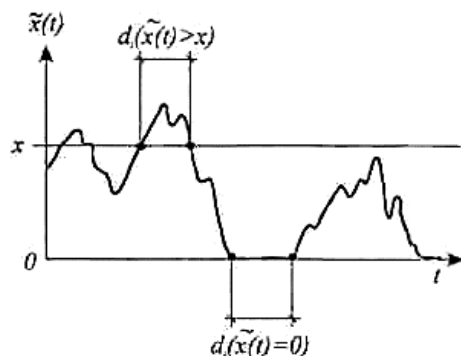


Рис. 1. Нестационарный процесс нагружения
Fig. 1. Nonstationary loading process

Разбиваем время t на ряд промежутков t_i , в течение которых возможно появление нагрузки $\tilde{q}_{\text{вр}}$, которое считается независимым событием. При $n = \frac{t}{t_i}$ с учетом корреляции нагрузки $\tilde{q}_{\text{вр}}$ вероятность её появления за срок эксплуатации в течение времени t будет определяться из выражения

$$V = 1 - (1 - Q)^n. \quad (2)$$

При $Q \Rightarrow 0$ $V = 1 - e^{-Pt}$. $P = \frac{Q}{t_i}$ – временная жесткость вероятности появления $\tilde{q}_{\text{вр}} > q_{\text{нор}}$. В таком случае при $P = 0,99$ $t = 50$ лет. $V = 0,01 = P \cdot 50 \cdot 365$. $P = \frac{1}{1825000} \left[\frac{1}{\text{сут}} \right]$. Тогда период повторяемости отказов 1 раз в течение 10 лет будет иметь следующее значение: $Q = \frac{1}{3650} = P_0$; $t = V \cdot 3650 = 36,5$ дней. Та-

ким образом, при обеспечении надежности мостовых конструкций, равной 0,99 с нормативным сроком эксплуатации 50 лет, достижение разрушающей нагрузки 1 раз в 10 лет допускает срок нормальной эксплуатации с обеспеченностью 0,99, равный 36,5 дня.

В случае возможного одновременного действия двух и более разрушающих нагрузок $Q = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n$ временная вероятность появления пиковых значений характеристик будет [4]:

$$P_0 = \frac{1-P}{t}; \quad Q = (1-P) \frac{t_i}{t}; \quad Q = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n. \quad (3)$$

В этих условиях усилия от нагрузок можно выразить известной формулой [5]:

$$N(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i Q_i(t), \quad (4)$$

где n – число независимых нагрузок; α_i – стандарт i -й нагрузки; $Q_i(t)$ – математическое ожидание, принимаемое в качестве нормативного значения нагрузки.

Вероятность появления временной подвижной нагрузки с пиковым значением, имеющей характер распределения Пуассона, будет иметь вид

$$P(t) = \frac{(V \cdot t)^n \exp(-V \cdot t)}{n}, \quad (5)$$

где t – время нахождения i -й нагрузки на пролетном строении.

В свою очередь, известно, что пуассоновский уровень надежности P_v связан с надежностью $P(t)$ выражением вида $P(t) = \Phi(X)$. $\Phi(X)$ принимается из табл. III, IV [6].

Рассматривая уровень надежности как отношение $\frac{R-S}{\sqrt{\sigma_{\text{спасч}}^2 + \sigma_{\text{норм}}^2}}$ при $R > 0$,

$S > 0$ при изменении надежности во времени, выполнение неравенства $R - S > 0$ можно считать справедливым [7].

При воздействии на пролетное строение группы подвижных нагрузок $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$, которые оцениваются как нестационарные случайные функции во времени, реакции балок пролетного строения на действие нагрузок представим некоторыми линейными параметрами вида $Z = C_1 q_1 + C_2 q_2 \dots C_n q_n$; C_1, C_2, C_n – жесткость балки. В этом случае динамическое предельное состояние балок на отрезке времени $t_0 \leq t \leq T$ будет определяться вероятностью случайного события, при котором $Z > Z^*$, где Z^* – предельное значение, соответствующее пределу текучести материала балок.

Отождествляя данное событие с перегрузкой, среднее число превышения параметра Z за время $t_0 - t_1$ определим формулой Райса в виде [8, 9]:

$$Z^*(t) = \int_0^\infty \frac{dz}{dp_i} dt, \quad (6)$$

где $p_i(p_1 : p_2 : p_n)$ – вероятность одно-, двукратных и т. д. перегрузок за время t_0 .

Тогда вероятность достижения предельного состояния балки пролетного строения будет зависеть от плотности распределения действия $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$ и среднеквадратичного отклонения от нормативного параметра. Принимая периоды изменения нагрузки $q_1(t)$ $T_1 = 5$ лет, $q_2(t)$ $T_2 = 12$ лет, $q_3(t)$ $T_3 = 19$ лет, эффективную частоту процесса несанкционированного нагружения ω_{ij} выразим через спектральную плотность процесса Φ_{ik} , име-

ющую значение: $\omega_1 = 0,2$; $\omega_2 = 0,3$; $\omega_4 = 0,4$. Приведенный период изменения нагрузки за периоды T_1, T_2, T_3 будет равен

$$T_0 = \frac{0,3 + 0,4}{\frac{0,2}{5} + \frac{0,3}{12} + \frac{0,4}{19}} = 12 \text{ лет.} \quad (7)$$

Вероятный период изменения нагруженности динамической нагрузки в среднем составляет $T_0 = 7$ лет при $Z^*/Z = 1,4$, а вероятность достижения предельного состояния характеризуется выражением

$$P(m) \cong \frac{7}{12} \exp \left[-\frac{(n-1)^2}{2 \sum \omega_i} \right], \quad (8)$$

где $n = \frac{Z_T^*}{Z}$ – коэффициент запаса прочности, равный 1,4.

Вероятность достижения предельного состояния при $T_0 = 12$ лет составляет 0,095:

$$P(m) \cong \frac{7}{12} \exp \left[-\frac{(1,4-1)^2}{2(0,9)} = 0,095 \right]. \quad (9)$$

Таким образом, вероятность достижения предельного состояния элементами балки в течение $T_0 = 12$ лет составляет 0,095.

При воздействии на пролетное строение моста динамической нагрузки в виде случайного транспортного потока с параметрами $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$ в условиях, когда разброс нагруженности не велик, но имеет случайный характер, определение предельных значений перемещений и усилий в балке с нормативной надежностью $P_n = 0,99$ связано с введением в расчеты коэффициента $\lambda_\phi < 1$, характеризующего синхронизацию при совпадении фаз всех воздействий от нагрузок в потоке при равенстве $\lambda_\phi = m$ [10, 11]; m – число динамических нагрузок $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$ (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные значения m, λ_ϕ

Table 1

Theoretical values of m, λ_ϕ

m	λ_ϕ					
	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,99
3	0,42	0,51	0,73	0,816	0,92	0,99
4	0,5	0,62	0,85	0,89	0,95	0,99
6	0,64	0,75	0,96	0,99	0,99	0,99
7	0,72	0,79	0,97	0,99	0,99	1,0

Анализ данных табл. 1 позволяет заключить, что при $m \geq 6$ вероятность превышения среднего значения перемещений или усилий от воздействия нагрузок практически не отражается на нормативном уровне надежности.

Известно, что модель функционирования конструкций пролетных строений мостов характеризуется надежностью, основанной на вероятности появления не только обычного, но и срывного отказа. Показатель вероятности появления срывного отказа представляется выражением

$$\Pi_{\beta} = \mathcal{J}_{\infty}^{-1}(1 - P(f)), \quad (10)$$

где $\mathcal{J}_{\infty}^{-1}$ – интеграл вероятности Гаусса проявления срывного отказа; $P(f) = P_i(M/Q)$; M, Q – функционалы реальной и расчётной нагрузки; $P_i = \frac{T_0}{T_i}$, где $T_i = 5, 12, 19$ лет.

Представляя несанкционированное воздействие на пролетное строение сверхрасчётными или сверхнормативными подвижными нагрузками, коррелируемыми случайным процессом в виде гауссовских кривых, можно наблюдать проявление срывного отказа с выбросом амплитудных значений случайных величин динамических характеристик (рис. 2).

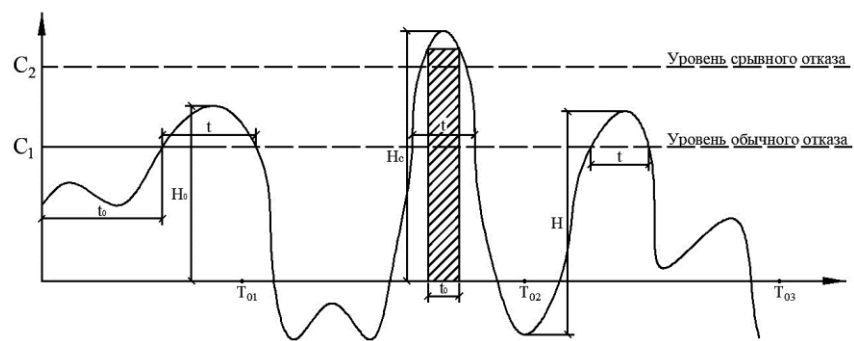


Рис. 2. Общий вид случайного процесса с реализацией обычного и срывного отказов
Fig. 2. Schematic of random process with the implementation of normal and disruptive failures

В качестве пороговых значений случайных нагрузок, при которых фиксируется уровень отказов, принимается среднее число превышений (выбросов) нагрузки в единицу времени t_i за период T_{0i} . Уровень случайной гармонической нагрузки со средним числом выбросов считается опасным, если число выбросов случайного процесса $q(t)$ на интервале T_{0i} превышает некий уровень плотности дисперсий числа выбросов σ_N , равный $\sigma_N^2(T) = 0,067\omega \cdot T$ [12], где ω – величина максимального выброса частоты колебаний, Гц.

Принимаем гармонические колебания случайного процесса в виде $g(t) = A(t, T)\cos(2\pi\omega t + \varphi(t))$, где $A(t, T)$, $\varphi(t)$ – меняющаяся функция амплитуды (перемещения) и фазы смещения количества опасных выбросов, предшествующих срывному отказу, которое может определяться выражением

$$N(T) = \sum_{i=1}^m H_i, \quad (11)$$

где m – число интервалов времени, подвергающееся анализу на срывной отказ за интервал T_i .

Используя табулированный интеграл вероятности Лапласа, формулу для определения среднего числа выбросов за интервал T , превышающий уровень C_2 , можно представить в следующем виде:

$$N_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^m N(T) \Delta t \text{ при } \Delta t = T_0.$$

Тогда вероятность проявления срывного отказа на промежутке времени $m_1 = t_1 - T_{01}, m_2 = t_2 - T_{02}, m_3 = t_3 - T_{03}$ равна

$$P(H_c) = N(T) \sum_{i=1}^m P_1 H_c, \quad (12)$$

где P_1 – вероятность того, что за предел $T_1 - T_{01}$ будет один выброс, приравненный к среднему числу выбросов; Δt – интервал времени малой длительности, приравненный к T_0 .

Таким образом, в случае одного срывного отказа при среднем числе случайных выбросов целевая функция стоимости пролетного строения моста в функции нормативного срока службы T_0 графически отображается в виде зависимости (рис. 3) и математическим выражением

$$C = C_0 + P_1(H_c)H(p), \quad (13)$$

где C_0 – начальная стоимость пролетного строения моста; $P_1(H_c)$ – срывной отказ с вероятностью $P(H_{\text{ср}})$; $H(p)$ – затраты на устранение ущерба, вызванного срывным отказом $P(H_0)$.

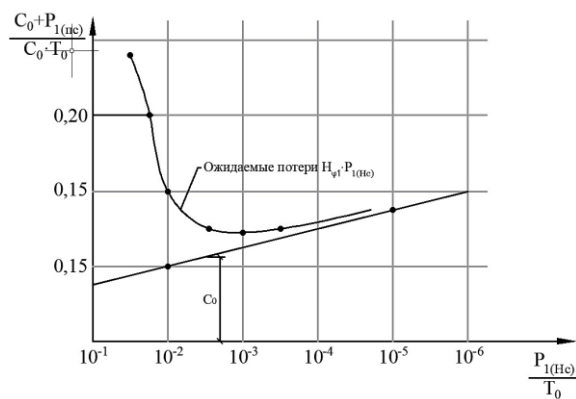


Рис. 3. График зависимости начальной стоимости C_0 и полных ожидаемых затрат C с вероятностью срывного отказа $P_1(H_c)$

Fig. 3. Dependence of the initial cost C_0 and expected total costs with the failure probability $P_1(H_c)$

Используя зависимость для определения $P_1(H_c)$ в виде $P_1(H_c) = \frac{10^{-4} \xi_p \cdot T_0}{L}$, окончательно получим значение доверительного интервала во времени для срывного отказа. С учетом коэффициента социальной значимости моста $\xi_p = 0,5$, $T_0 = 50$ лет среднее количество автомобилей, находящихся на пролетном строении в предполагаемый момент срывного отказа, в зависимости от длины пролета, равно: $L = 42,5m$, $n_a = 4$. Тогда $P_1(H_c) = \frac{10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 50}{4} = 6 \cdot 10^{-3}$.

Рассматривая пиковые случайные выбросы в стадии развития срывного отказа образованием чрезмерных амплитуд колебаний (рис. 4), формулу для определения значения $H(p)$ принимаем в виде [13, 14]:

$$H(p) = U + U_n \cdot W, \quad (14)$$

где U – косвенный убыток от срывного отказа, не зависящий от размеров несущих балок; U_n – прямые убытки, связанные с восстановлением балок; W – момент сопротивления сечения балки. Представим прочность изгибаемой гармоническими колебаниями балки выражением вида $R_s = W \cdot R - M_{пр}$, в котором R – предел прочности материала балки; $M_{пр}$ – предельный изгибающий момент от $P_{вр}$ с пиковыми значениями случайных выбросов, вызывающих разрушение [15].

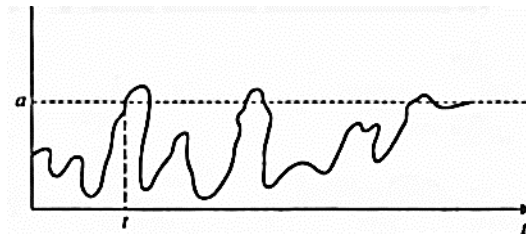


Рис. 4. Выбросы случайной функции
Fig. 4. Random function peaks

Предельное состояние предполагает изменение момента сопротивления сечения балки (W), которое пропорционально изменению коэффициента γ – коэффициента неразрушимости конструкции, определяемого из равенства

$$C = C_0 \cdot \gamma^{1-\Theta}, \quad (15)$$

где Θ – коэффициент напряженного состояния элемента балки пролетного строения и формы поперечного сечения: для изгибаемых элементов $\Theta = \frac{1}{3}$; прямоугольных – $\frac{6}{5}$; двутавровых – 2–5 [16]. Изменение момента сопротивле-

ния сечения (W) пропорционально γ в соотношении $\frac{\gamma_1}{\gamma} = \frac{W_1}{W}$. Тогда соотношение площади сечения элемента до срывного отказа и после него будет

$$\frac{A_1}{A} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right)^{2/3}. \quad (16)$$

Принимая стоимость элемента сечения балки практически пропорциональной площади его сечения A , зависимость (16) $C = C_0 \cdot \gamma^{1-\Theta}$ принимаем в виде $C = C_0 \left(\frac{A_1}{A} \right)$. Тогда $C = C_0 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right)^{2/3}$. При $\gamma = 1$ $C = C_0 \cdot \gamma^{2/3}$ и $\Theta \approx 1/3$.

В результате пиковых случайных выбросов повреждение одного или нескольких элементов балки вызывает нарушение нормальной работы всего пролетного строения, а величина γ – не что иное, как обратная величина вероятности повреждения [17, 18]:

$$P \approx 1 - e^{-n \cdot P(t)}, \quad (17)$$

где n – количество элементов в балке; $P(t)$ – вероятность повреждения элементов в течение времени T .

Разбиваем весь срок работы элементов балки исходя из нормального закона распределения вероятности времени исправной работы каждого элемента, заключенного в промежутке от 0 до T , вероятность повреждения в момент проявления пиковых случайных выбросов или срывного отказа за этот промежуток времени будет

$$P(T) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^T \exp \left(-\frac{(T - T_0)^2}{2\sigma^2} \right) dT, \quad (18)$$

где T – время исправной работы элемента балки в целом; T_0 – средний срок службы (нормативный); σ^2 – дисперсия времени исправной работы всех элементов балки (среднее значение квадрата отклонения срока службы элемента). Металлические балки пролетных строений мостов обладают достаточно высокой степенью однородности составляющих элементов и сроков службы. В случае равенства $P(T)$ для всех элементов балки, состоящей из n числа элементов, вероятность повреждения балки за все время T будет выражаться формулой

$$\frac{P}{n} = \frac{1}{2} - \Phi(x), \quad (19)$$

где $\Phi(x)$ – известная в теории вероятности функция нормального распределения Лапласа $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-1/2x^2} dx$; $x = \frac{T_0 - T}{\sigma}$.

Исходя из среднего срока службы элементов балки T_0 , среднего значения квадрата отклонения срока службы элементов балки от его среднего срока службы (σ^2) и числа элементов n балки, формула (19) позволяет рассчитать

вероятность повреждения P балки в течение времени T (табл. 2). Время нормальной безаварийной работы балки пролетного строения можно определить по упрощенной зависимости

$$T = T_0 - X \cdot \sigma. \quad (20)$$

Таблица 2

Период нормативной работы балок пролетных строений мостов

Table 2

Normative operation time of beams

Проект, г.	Динамическая нагрузка	Нормативный срок службы T_0 , г.	Кол-во элементов в балке	Срок нормативной работы T , г.	Фактически
1947–1949	Н-13, Т-60	50	5	48	Т
1953	Н-18, НГ-60	50	5	48	Т
№ 4793км, 1963	Н-30, НК-80	55	3	46	Т*
№ 4801км, 1969	Н-30, НК-80	60	3	57,6	Т*
№ 3282км, 1975	Н-30, НК-80	60	5	58	Т*
№ 3503, 1984	А-11, НК-100	60	4	57	Т*
1994	А-11, НК-100	60	5	57,2	А
2004	А-14, К-102,8	60	6	≈ 60,0	А

Примечания:

1. Т – типовое решение; А – альтернативное решение; Т* – типовые проекты [19, 20].

2. Коэффициент безаварийного использования элементов балок для всех пролетных строений металлических мостов составит $\frac{T}{T_0} = 0,9–0,96$ из условия возможного повреждения

элементов (P_p) в случае пиковых случайных величин проявления срывного отказа из выраже-

$$\text{ния } P_p = \frac{1}{2} - \Phi(x).$$

3. В то же время, в зависимости от качества проекта и конструкции несущих балок пролетного строения, коэффициент использования элементов в работе на динамические нагрузки возрастает от 0,4 до 0,6 [20, 21].

С принятием в качестве переменной величины T дополнительного времени безаварийной эксплуатации замена стали нормальной прочности марки Вст3 мост М16с низколегированными сталями повышенной прочности 09Г2С 14Г2, 15ХСНД и высокой прочности 10ХСНД, 12Г2СМФ, 14Х2ГМР и другими приводит к изменению соотношения между вероятностью повреждения балки и её элементами, выполненными как в моностальном, так и в гибридных вариантах. В этом случае вероятность повреждения элементов (P_p) в промежутке времени $T_0–T–T_1$ сводится к минимуму при равенстве величин вероятностей возможных повреждений. Использование в этих случаях коэф-

коэффициента неоднородной вероятности нормальной работы элементов $\frac{\sigma}{T_0}$ сравнивается с коэффициентом использования $\frac{T}{T_0}$, стремящегося к предельной величине, равной 1.

Выводы

Проведенное в статье исследование основано на предположении равенства величин вероятности повреждения элементов балки при нормальном распределении сроков службы.

Рассмотрены возможные варианты с различными величинами вероятностного повреждения и законами распределения.

Повышение надежности работы балок пролетных строений рассматривает исключительно возможные соотношения коэффициента неоднородной вероятности нормальной работы элементов по сравнению с коэффициентами использования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Аугустин Г., Баратта А., Капнати Ф.* Вероятностные методы в строительном проектировании. Москва : Стройиздат, 1988. 573 с.
2. *Wen Y.K.* Stochastic dependencies in load combination, proceedings // Structural safety and reliability : proceedings of ICOSSAR '81, the 3rd International Conference on Structural Safety and Reliability, the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, June 23–25, 1981 / Ed. T. Moan, M. Shinozuka. Elsevier Scientific Pub. Co., 1981. P. 89–103.
3. *Булычев А.П., Сухов Ю.Д.* Применение теории надежности для нормирования расчетных значений нагрузок // СМРС. 1973. № 4. С. 15–19.
4. *Ржаницын Р.А.* Расчет конструкций на сочетание нагрузок // Проблемы надежности в строительном проектировании. Свердловск, 1972. С. 184–191.
5. *Райзер В.Д.* Теория надежности в строительном проектировании. Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1998. 302 с.
6. *Володин Б.Г., Ганин М.П., Динер И.Я., Комаров Л.Б., Свешников А.А., Старобин К.Б.* Сборник по теории вероятностей, математической статистики и теории случайных функций / под общ. ред. А.А. Свешникова. Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2008. 445 с.
7. *Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А.* К вопросу прогнозирования динамической надежности пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 6. С. 170–181. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181
8. *Болотин В.В.* О сочетании случайных нагрузок, действующих на сооружения // Строительная механика и расчет сооружений. 1962. № 2. С. 1–5.
9. *Raizer V.D.* Reliability of structures. analysis and applications. USA : Backbone Publishing Company, 2009. 146 p. ISBN: 978-0974201979.
10. *Цейтлин А.И., Гусева Н.И.* Расчет конструкций на синхронные групповые воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. № 6. С. 46–52.
11. *Ditlevsen O., Madsen H.O.* Structural reliability methods. 2nd edition. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2007. 373 p.
12. *Тихонов В.И.* Выбросы случайных процессов // Успехи физических наук. 1962. Т. 77. Вып. 3. С. 449–480.
13. *Райзер В.Д.* Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1986. 186 с.
14. *Racwitz R, Schrupp K.* Quality control, prof testing and structural reliability // Structural Safety. 1985. V. 2. P. 239–244. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(85\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0167-4730(85)90030-X)

15. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. Москва, 1969. 329 с.
16. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. Москва : Наука, 1975. 704 с.
17. Сидоров В.И. О методах расчета надежности работы систем, содержащих большое число элементов // Известия АН СССР. ОТН. 1954. № 6. С. 3–12.
18. Faber M.H. On the treatment of uncertain-ties and probabilities in engineering decision analysis // Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2005. V. 127. № 3. P. 243–248. DOI:10.1115/1.1951776
19. Боровиков А.Г., Картопольцев В.М. Оценка грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений металлических автодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4. С. 273–279.
20. Гордеев В.Н., Лантух-Ляценко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичигин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. 478 с.
21. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Разработка перспективных (гибридных) конструкций пролетных строений мостов из сталей различной прочности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 3. С. 171–182.

REFERENCES

1. Augusti G., Baratta A., Casciati F. Probabilistic methods in structural engineering. Moscow: Stroyizdat, 1988. 573 p. (Russian translation)
2. Wen Y.K. Shochastic dependencies in load combination, proceedings. In: *Proc. 3rd Int. Conf. 'Structural Safety and Reliability'*, Norwegian Institute of Technology, T. Moan, M. Shinozuka, Eds., Trondheim, 1981. Pp. 89–103.
3. Bulychev A.P., Sukhov Iu.D. Application of the reliability theory for normalisation of the calculated load values. *SMRS*. 1973; (4): 15–19. (In Russian)
4. Rzhantsyn R.A. Calculation of structures for load combination. In: *Reliability problems in building design*. Sverdlovsk, 1972. Pp. 184–191. (In Russian)
5. Raizer V.D. Theory of reliability in construction design. Moscow: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 1998. 302 p. (In Russian)
6. Volodin B.G., Ganin M.P., Diner I.Y., Komarov L.B., Sveshnikov A.A., Starobin K.B. Collection on probability theory, mathematical statistics and theory of random functions, A.A. Sveshnikov, Ed., Saint-Petersburg; Moscow; Krasnodar: Lan, 2008. 445 p. (In Russian)
7. Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V., Alekseev A.A. Towards predicting dynamic reliability of bridge spans. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24(6): 170–181. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-170-181 (In Russian)
8. Bolotin V.V. Combination of random loads of structures. *Stroitelnaia mekhanika i raschet sooruzhenii*. 1962; (2): 1–5. (In Russian)
9. Raizer V.D. Reliability of structures. Analysis and applications. USA: Backbone Publishing Company, 2009. 146 p. ISBN: 978-0974201979.
10. Tseitlin A.I., Guseva N.I. Calculation of structures on synchronous group impacts. *Stroitelnaia mekhanika i raschet sooruzhenii*. 1977; (6): 46–52. (In Russian)
11. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods, 2nd ed., Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2007. 373 p.
12. Tikhonov V.I. Emissions of random processes. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1962; 77 (3): 449–480. (In Russian)
13. Raizer V.D. Methods of the theory of reliability in tasks of norming of building design parameters. Moscow: Stroyizdat, 1986. 186 p. (In Russian)
14. Racwitz R., Schrupp K. Quality control, prof testing and structural reliability. *Structural Safety*. 1985; 2: 239–244. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(85\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0167-4730(85)90030-X)
15. Smirnov N.V., Dumin-Barkovskii I.V. Course of the theory of probabilities and mathematical statistics. Moscow, 1969. 329 p. (In Russian)

16. Timoshenko S.P. Strength and vibrations of structural elements. Moscow: Nauka, 1975. 704 p. (In Russian)
17. Sidorov V.I. Methods of reliability analysis of systems containing large number of elements. *Izvestia AS USSR*. 1954. (6): 3–12. (In Russian)
18. Faber M.H. On the treatment of uncertain-ties and probabilities in engineering decision analysis. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2005; 127(3): 243–248. DOI:10.1115/1.1951776.
19. Borovikov A.G., Kartopoltsev V.M. Assessment of load capacity of composite-girder bridge spans. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; (4): 273–279. (In Russian)
20. Gordeev V.N., Lantukh-Liashchenko A.I., Pashinskii V.A., Perelmuter A.V., Pichigin S.F. Loads and impacts on buildings. Moscow: Izd-vo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2006, 478 p. (In Russian)
21. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V. Hybrid design of bridge span structures made of different strength steel. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; (3): 171–182. (In Russian)

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, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Audrei V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy 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 09.10.2023
Одобрена после рецензирования 26.10.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 09.10.2023
Approved after review 26.10.2023
Accepted for publication 09.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 196–217.

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 (6): 196–217.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-196-217

EDN: ZHAEBN

ОЦЕНКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНУТРИПРОМЫСЛОВЫХ АВТОДОРОГ В СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ЯНАО

Олег Анатольевич Бычков, Галина Вениаминовна Пушкарева

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

Аннотация. *Актуальность.* Ямало-Ненецкий автономный округ – это крупнейшая углеводородная сырьевая база, поставляющая газ в объеме до 300–330 млрд м³/год и жидкие углеводороды до 10–15 млн т/год. Добыча минерального сырья сопровождается развитием инженерной инфраструктуры: кустовыми площадками, резервуарами хранения нефти, перекачивающими станциями и автомобильными дорогами, осуществляющими связь как внутри площадок, так и между ними. Район уникален по сложности инженерно-геологических условий за счет многолетнемерзлых грунтов с особо сложными геокриологическими условиями в верхней части разреза. Оценка существующих инженерно-геологических условий обустройства месторождений, а также неблагоприятных процессов, опасностей, рисков и воздействий на проектируемые, строящиеся и эксплуатируемые автомобильные дороги к кустовым площадкам, несомненно, актуальна.

Цель работы. Оценить инженерно-геологические условия проектирования, строительства и эксплуатации внутрипромысловых автомобильных дорог на примере Северо-Комсомольского месторождения.

Методы исследования. Изучение, анализ и обобщение материалов инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной, рабочей документации по обустройству кустовой площадки № 11 Северо-Комсомольского месторождения, выполненных АО «ТомскНИПИнефть». Определение состава и физических свойств грунтов земляного полотна на образцах ненарушенной структуры, отобранных при оборудовании постов наблюдений, выполненных в лаборатории грунтоведения и механики грунтов кафедры ИГМСД ТГАСУ.

Результаты. Региональные особенности природных и инженерно-геологических условий территории ЯНАО показали, что при трассировании автомобильных дорог встречаются участки с твердомерзлыми грунтами и участки с полным или частичным отсутствием многолетнемерзлых грунтов. В первом случае проектирование земляного полотна предусматривает обеспечение поднятия верхнего горизонта многолетней мерзлоты не ниже подошвы насыпи и сохранение его на этом уровне в течение всего периода эксплуатации дороги – это 1-й принцип проектирования. Во втором случае проектирование предусматривает предварительное оттаивание линз мерзлых грунтов и осушение дорожной полосы до возведения земляного полотна – 3-й принцип проектирования. При проектировании по 1-му принципу положение многолетнемерзлых грунтов в основании обеспечивается назначением соответствующей высоты насыпи при применении несцементированных дорожно-строительных материалов и устройством специальных прослоек из теплоизолирующих материалов с их теплотехническим расчетом (торфа,

пенополистирола, твердомерзлых грунтов). Первый принцип предусматривает возведение земляного полотна только в зимний период. Для предотвращения деформации откосов насыпей рекомендуется устраивать бермы из торфа, закрепленного геосинтетическим материалом. Следует не допускать рекультивации земель в зоне строительства дороги во избежание эрозии почвенного покрова.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, многолетняя мерзлота, устойчивость, внутрипромысловые автомобильные дороги

Для цитирования: Бычков О.А., Пушкарёва Г.В. Оценка инженерно-геологических условий проектирования внутрипромысловых автодорог в северных территориях ЯНАО // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 196–217. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-196-217. EDN: ZHAEBN

ORIGINAL ARTICLE

GEOTECHNICAL CONDITIONS OF IN-FIELD ROAD DESIGN IN NORTHERN TERRITORIES OF YAMALO-NENETS AUTONOMOUS OKRUG

Oleg A. Bychkov, Galina V. Pushkareva

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The Yamal-Nenets Autonomous District is the largest hydrocarbon resource base, supplying up to 300–330 billion m³/year of gas and up to 10–15 million t/year of liquid hydrocarbons. Mineral extraction is accompanied by the development of engineering infrastructure, namely: cluster pads, oil storage tanks, pumping stations and automobile roads that link both within and between sites. The area is unique in terms of complexity of geotechnical conditions due to permafrost soils in particular in the upper open-cast. The assessment of geotechnical conditions of the field development as well as adverse processes, hazards, risks and impacts on designed, constructed and operating roads to the cluster pads is undoubtedly relevant.

Purpose: The evaluation of geotechnical conditions of design, construction and operation of in-field roads in the Severo-Komsomolsk field.

Methodology/approach: The analysis and generalisation of materials of geotechnical surveys for design and construction documentation of the cluster pad 11 in the Severo-Komsomolsk oil-field, performed by AO "TomskNIPIneft". Determination of composition and physical properties of undisturbed soils taken when equipping observation posts, performed in the Laboratory of Ground Science and Soil Engineering, TSUAB.

Research findings: Natural and geotechnical conditions of the Yamal-Nenets Autonomous District includes areas with hard frozen soil and areas with complete or partial absence of permafrost soils. In the first case, the subgrade design envisages that the upper permafrost horizon is not lower than the embankment bottom and remains at this level during the entire period of the road operation. In the second case, the design implies preliminary thawing of frozen soil lenses and road drainage prior to the subgrade construction. In the first case, the position of perennially frozen soils is evaluated by the appropriate embankment height, when non-cemented road-building materials are used, and by arranging heat-insulating layers (peat, polystyrene foam, hard frozen soil) with their thermotechnical calculation. The first principle implies the subgrade construction only in winter. To prevent deformation of embankment slopes, it is recommended to build peat benches fixed with a geosynthetic material. Land reclamation in the road construction zone should be avoided to prevent erosion of the soil cover.

Keywords: geotechnical conditions, permafrost, stability, in-field road

For citation: Bychkov O.A., Pushkareva G.V. Geotechnical conditions of in-field road design in northern territories of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Vestnik

Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 196–217. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-196-217. EDN: ZHAEBN

Введение

Ямало-Ненецкий округ – это крупнейший центр по добыче газа и нефти, расположенный в арктическом районе Западно-Сибирской низменности в I дорожно-климатической зоне (ДКЗ) [1, 2], посередине северной части Евразии. Регион охватывает полуострова Гыданский, Тазовский, Ямал, склоны Полярного Урала и Приполярья, острова Карского моря. На формирование суровых климатических условий влияют врезающиеся в сушу холодные морские заливы, близость северного Карского моря, многолетняя мерзлота, обилие рек, озёр, заболоченной местности. Территория региона находится в трех климатических поясах: субарктическом, арктическом и в зоне северной полосы. В целом преобладает континентальный климат с затяжной холодной зимой (с бурями, метелями, морозами, полярным сиянием) и коротким прохладным, ветреным летом. Зимой температура может опуститься до -55°C , а летом подняться до $+30^{\circ}\text{C}$ [3].

В качестве опорной территории для изучения и оценки инженерно-геологических условий выбрана кустовая площадка № 11 одного из крупнейших по запасам высоковязкой нефти Северо-Комсомольского месторождения, территория которого интенсивно обустроивается. Многолетнемерзлые грунты (ММГ) с особо сложными геокриологическими условиями в верхней части разреза и особой чувствительностью к техногенным воздействиям определяют уникальность района по тяжести инженерно-геологических условий. Постоянно действующая дорожная сеть на месторождении отсутствует. В качестве производственного транспорта используются тракторы и вездеходы. Перевозка груза и полевые геолого-геофизические работы осуществляются большей частью в зимний период после промерзания болот и рек. Регулярные грузоперевозки производятся с помощью авиации.

Инженерные изыскания автомобильной дороги к объекту «Кустовая площадка № 11 Северо-Комсомольского месторождения» выполнены управлением инженерно-строительных изысканий ОАО «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» [4]. Участок проведения работ характеризуется массивно-островным распространением ММГ [5]. Соответственно земляное полотно автомобильной дороги следует проектировать разными методами. На участках с массивным распространением ММГ их горизонт необходимо поднять под основание земляного полотна и создать условия для его сохранения на период эксплуатации. При островном распространении ММГ необходимо опустить мерзлоту путем расчистки полосы отвода дороги от растительности и снега на период не меньше года и осуществлять строительство обычными методами.

Физико-географическое положение района строительства

Северо-Комсомольское нефтегазоконденсатное месторождение расположено на территории Пуровского и Надымского районов ЯНАО. Оно находится в 170 км от Полярного круга и в 100 км от г. Губкинского (рис. 1).

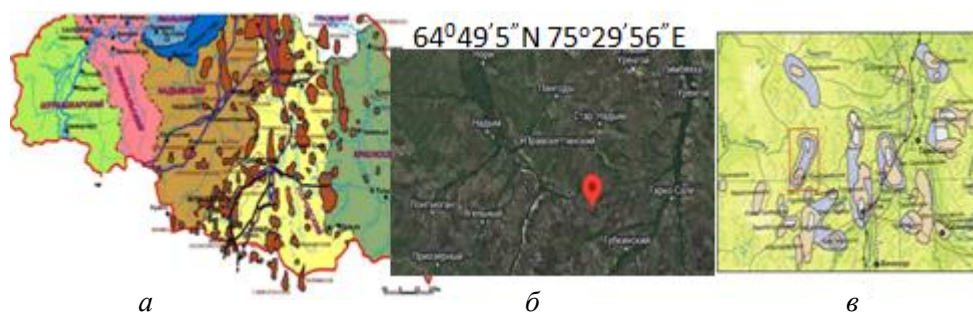


Рис. 1. Обзорная карта Ямало-Ненецкого автономного округа [1] (а); географическое положение Северо-Комсомольского месторождения (б); обзорная карта района расположения Северо-Комсомольского месторождения (в)

Fig. 1. The Yamal-Nenets Autonomous District map [1] (a); geographical location of the North Komsomolsk field (b); North Komsomolsk field location (c)

Участок района работ в административном отношении расположен в южной части Северо-Комсомольского месторождения на территории Надымского района (рис. 2).



Рис. 2. Схема расположения Северо-Комсомольского месторождения (а) и общий вид на кустовую площадку № 11 (б) [2]

Fig. 2. Location of the Severo-Komsomolsk field (a) and general view of cluster pad 11 (b)

Согласно ландшафтному районированию Западной Сибири, район работ находится на территории северотазежной зоны Обско-Тазовской провинции (рис. 3, а) [6]. С географической точки зрения район изысканий расположен на территории Западно-Сибирской равнины в Обь-Енисейском междуречье и принадлежит к бассейну Карского моря. Естественный рельеф изучаемой территории представляет собой плоскую заболоченную равнину. Абсолютные отметки местности в районе изысканий изменяются в пределах от 73,04 до 76,54 м. Поверхность равнины насыщена мерзлотными формами рельефообразования – мелкобугристыми, крупнобугристыми и плоскобугристыми торфяниками, заторфованными озерами. В районе изысканий распространены следующие типы ландшафта: суходольные участки, талые озера и торфяники с участками распространения мерзлых грунтов (рис. 3, б).

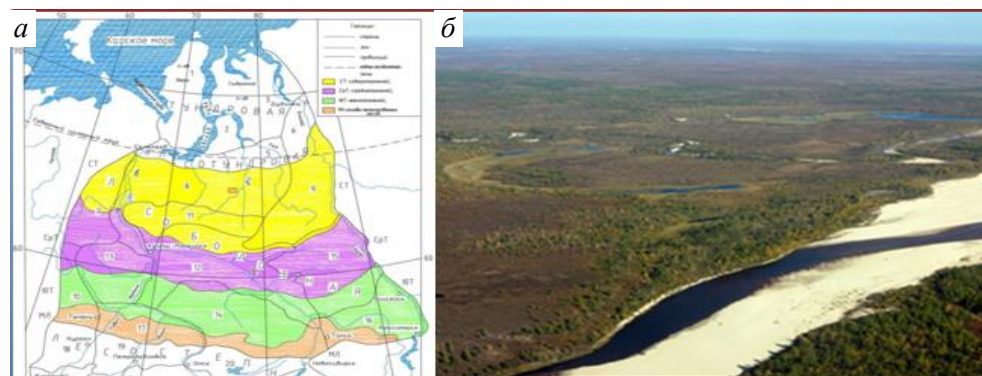


Рис. 3. Ландшафтные зоны Западной Сибири (а); естественный рельеф изучаемой территории (б) [1]

Fig. 3. Landscape zones (a) and natural relief (b) of West Siberia

Растительность в районе работ представлена кустарничками, мхами и частично смешанным лесом: сосной, кедром, елью, березой. Заболоченные участки покрыты влаголюбивой растительностью: осокой и камышом; гидрографическая сеть участка изысканий – многочисленными болотными озерами и перетоками между ними.

Геологические и геокриологические условия участка проектируемой автомобильной дороги

Геологический разрез исследуемой территории представлен переслаиванием суглинков и песков. Грунты находятся как в талом, так и в мерзлом состоянии. Границы талых и мерзлых грунтов по глубине приведены на продольном профиле проектируемой автомобильной дороги. В геологическом строении территории на исследуемую глубину 10,0–17,0 м принимают участие:

1. Торф сильноразложившийся сильнольдистый атакситовой криотекстуры, при оттаивании маловлажный 1-го типа, мощностью от 0,6 до 1,0 м. По трассе автомобильной дороги к кустовой площадке торф встречен на ПК0+00 – ПК1+45,2 с поверхности до глубины 1,0 м.

2. Суглинок легкий песчанистый мягкопластичный. Мощность суглинка изменяется от 0,4 до 7,3 м. По трассе автомобильной дороги суглинок встречен на ПК0+27 – ПК1+55 мощностью до 3,4 м, а также на ПК5+71 – ПК12+51, вскрытой мощностью 3,0–8,2 м.

3. Суглинок легкий песчанистый текучепластичный мощностью от 2,4 до 3,8 м. Встречен по трассе автомобильной дороги в средней части разреза, распространен локально.

4. Песок мелкий плотный водонасыщенный. Мощность песка изменяется от 1,0 до 4,8 м. По трассе автомобильной дороги вскрыт в верхней части разреза в интервале глубин от 0,6 до 4,6 м, вскрытой мощностью от 1,2 до 4,0 м.

5. Песок мелкий средней плотности твердомерзлый массивной криотекстуры слабльдистый, при оттаивании водонасыщенный. Мощность песка изменяется от 0,4 до 2,2 м. По трассе автомобильной дороги к кустовой площадке песок имеет широкое распространение по всему изученному разрезу.

Согласно схеме общего геокриологического районирования Западно-Сибирской плиты [7], участок проведения работ располагается в Надым-Пуровской области и характеризуется массивно-островным распространением многолетнемерзлых грунтов (рис. 4).

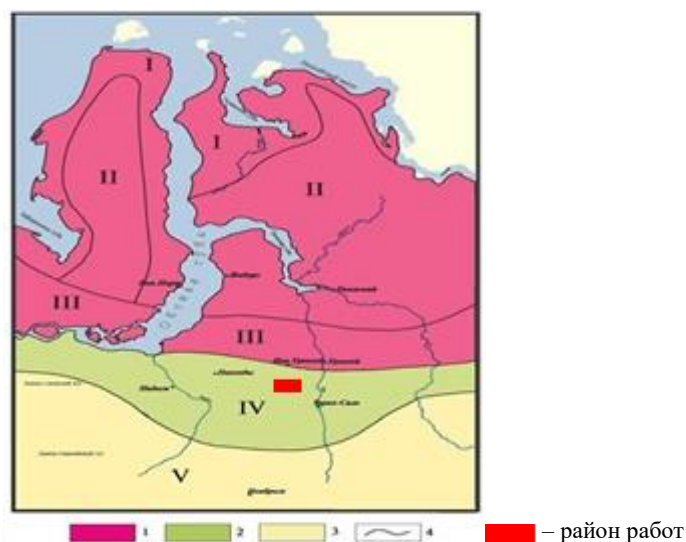


Рис. 4. Районирование территории Западно-Сибирской нефтегазовой провинции по сложности разреза криогенной толщи [7]:

1 – особо сложные; 2 – сложные; 3 – несложные; 4 – границы районов; I – Ямало-Гыданский район; II – Ямало-Гыдано-Тазовский; III – Обская губа-Тазовский; IV – Надым-Пур-Тазовский; V – Обско-Пур-Тазовский район

Fig. 4. Zoning of the West Siberian oil and gas province by complexity of cryogenic strata section:

1 – especially complex; 2 – complex; 3 – not complex; 4 – district boundaries; I – Yamal-Gydan; II – Yamal-Gydan-Tazovsky; III – Obkaya Guba-Tazovsky; IV – Nadym-Pur-Tazovsky; V – Obko-Pur-Tazovsky Districts

Тип сезонного промерзания и оттаивания (деятельный слой) грунтов по классификации [8] континентальный. Сезонное промерзание начинается с переходом среднесуточной температуры воздуха через 0°C в область отрицательных значений в конце сентября – начале октября. Глубина промерзания обусловлена в основном литологическим составом поверхностного слоя, его предзимней влажностью, а также режимом снегонакопления. На плоских безлесных и редколесных участках глубина промерзания составляет 0,6–1,0 м.

Сезонное оттаивание грунтов начинается в конце мая – начале июня и заканчивается в сентябре – октябре. Глубина сезонного оттаивания составляет 0,5–4,0 м на торфяниках и 0,3–4,5 м в местах выхода на дневную поверхность песчано-глинистых грунтов.

Мерзлые грунты озерно-болотного генезиса представлены торфом мерзлым сильноразложившимся. Мерзлые грунты озерно-аллювиального генезиса представлены песками и суглинками. Пески характеризуются массивной криотекстурой, суглинки – чаще слоистой криотекстурой (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика мерзлых толщ грунтов на территории проектирования

Table 1

Permafrost soil on the territory

№ района, район	Распространение ММГ	Глубина залегания от подошвы талого слоя	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сложность по геокриологическим условиям
IV Надым-Пур-Тазовский	Массивное, островное	До 10 м	От -1 до -3	Сложный

Трасса проектируемой автомобильной дороги к кустовой площадке № 11 сложена как мерзлыми, так и талыми грунтами. На участке изысканий вскрыта мерзлота сливающегося и несливающегося типа. Распространение мерзлых грунтов отражено на карте мерзлотных условий (рис. 5).

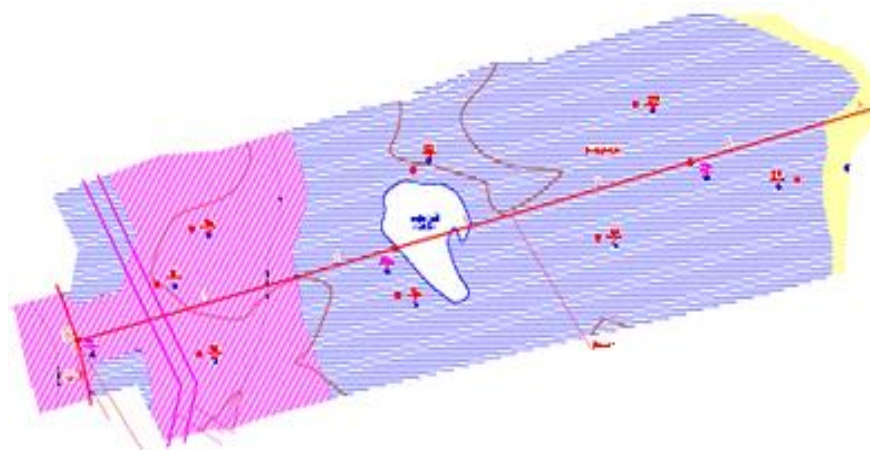


Рис. 5. Распространение и условия залегания мерзлых грунтов по трассе автомобильной дороги [4]:

/// – участки распространения твердомерзлых грунтов сливающегося типа;

/// – участки распространения твердомерзлых грунтов несливающегося типа

Fig. 5. Distribution and conditions of frozen soil on the road [4]:

/// – hard frozen soil of merging type;

/// – hard frozen soils of non-merging type

Ямало-Ненецкий автономный округ расположен в первой дорожно-климатической зоне в северной и южной подзонах [8]. Согласно схеме инженерно-геологического районирования Западно-Сибирской плиты, участок проведения работ относится к провинции преимущественного распространения пород без жестких связей, к зоне распространения многолетнемерзлых дисперсных грунтов, подзоне несплошного (прерывистого) распространения многолетнемерзлых грунтов [5]. Непосредственно территория изысканий относится к Пуровской области позднечетвертичных аллювиальных и озерно-

аллювиальных террасовых равнин, сложенных мерзлыми и талыми сильноувлажненными грунтами (рис. 6). Из рисунка видно, что район работ находится на границе первой (северной) и третьей (южной) подзон I ДКЗ, чем и обусловлено одновременное присутствие на участке проектирования твердомерзлых грунтов сливающегося и несливающегося типов.

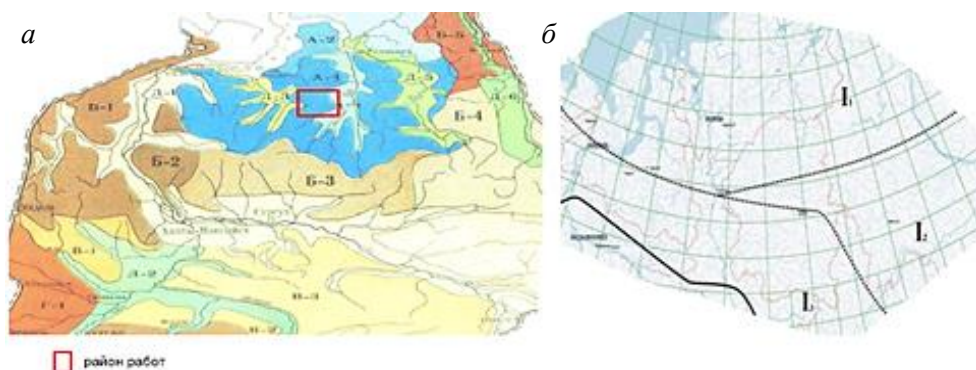


Рис. 6. Схема инженерно-геологического районирования. А-4 – Северная Обь-Енисейская область (а); участок I ДКЗ с подзонами: I₁ – северная; I₂ – центральная; I₃ – южная (б) [1]

Fig. 6. Schematic of geotechnical zoning: A-4 – Northern Ob-Yenisei region (a); I₁ – northern; I₂ – central; I₃ – southern (b) subzones

Инженерно-геологическая характеристика участка проектирования

Начало трассы автомобильной дороги к кустовой площадке № 11 ПК0+00,00 соответствует ПК265+01,63 ранее проектируемой трассы автомобильной дороги к кустовой площадке № 10. Конец трассы ПК12+51,19 расположен на кустовой площадке № 11. Протяженность трассы составляет 1,251 км. Рельеф участка прохождения трассы пологоволнистый, абсолютные отметки поверхности изменяются от 73,04 до 76,54 м. Заболоченность по трассе составляет 12 %. На суходольных участках развит почвенно-растительный слой мощностью 0,2 м. Глубина деятельного слоя – 0,6 м. В соответствии с [8] тип местности по степени увлажнения – 3 (мокрые места). В процессе изысканий по трассе вскрыты сезонно-мерзлые, мерзлые и талые грунты. Радиационно-тепловые талики распространены при близком расположении трассы автомобильной дороги с озерами, талики гидрогенного типа выявлены непосредственно на участках прохождения через озеро.

По всей длине трассы присутствует мерзлота как сливающегося, так и несливающегося типа. Глубина деятельного слоя на всем протяжении колеблется от 0,6 до 1,0 м. Талые грунты присутствуют на участках трассы ПК0+00 – ПК5+71 мощностью от 1,2 до 3,2 м; ПК5+71 – ПК12+51 мощностью от 9,4 до 16,4 м. Талые грунты представлены суглинками легкими песчанистыми мягкопластичными, песками мелкими плотными водонасыщенными. Мерзлые грунты имеют различные криотекстуры: массивную и слоистую.

Песок мелкий средней плотности твердомерзлый массивной криотекстуры слабодистый, при оттаивании водонасыщенный, имеет широкое

распространение по всему изученному разрезу с глубины 0,4 до 2,2 м. На ПК2+44,59 трасса пересекает небольшое озеро глубиной 0,5 м, шириной по створу 40,5 м и на ПК2+90,37 шириной по створу 10 м. Гидрогеологические условия изучаемой территории характеризуются наличием болотных и грунтовых вод.

В соответствии с ГОСТ 20522¹ по трассе автомобильной дороги выделен 1 слой и 5 инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

1. Слой 1 – почвенно-растительный слой, мерзлый. На сухоходольных участках распространен мощностью 0,2 м.

2. ИГЭ-340 – суглинок легкий песчаный мягкопластичный. ПК0+27 – ПК1+55 в интервале глубин от 3,8 до 7,2 м мощностью до 3,4 м, также на ПК5+71 – ПК12+51 вскрытой мощностью 3,0–8,2 м.

3. ИГЭ-540 – песок мелкий плотный водонасыщенный. Вскрыт в верхней части разреза в интервале глубин от 0,6 до 4,6 м вскрытой мощностью от 1,2 до 4,0 м.

4. ИГЭ-м340 – суглинок пластично-мерзлый слабодыстый слоистой криотекстуры, при оттаивании легкий мягкопластичный. Суглинок вскрыт в основном в нижней части изученного разреза на ПК0+27 – ПК5+71 с глубины 7,2–7,7 м до глубины 10,0 м вскрытой мощностью от 2,3 до 2,8 м.

5. ИГЭ-м350 – суглинок пластично-мерзлый льдистый слоистой криотекстуры, при оттаивании легкий текучий. Суглинок вскрыт в основном в средней части изученного разреза на ПК1+55 – ПК5+71 с глубины 1,8–2,0 м до глубины 7,3–7,7 м вскрытой мощностью от 5,5 до 5,7 м.

6. ИГЭ-м540 – песок мелкий средней плотности твердомерзлый массивной криотекстуры слабодыстый, при оттаивании водонасыщенный. Имеет широкое распространение по всему изученному разрезу.

Во время строительства необходимо учесть следующие неблагоприятные факторы, осложняющие строительство:

– заболачивание территории и развитие торфов. Максимальная глубина болот достигает 1,0 м. Болота по проходимости строительной техникой, согласно [11], 1-го типа, сложены торфом сильноразложившимся;

– морозное пучение. Согласно [9], по степени опасности морозного пучения территория относится к «опасным».

Нормативная глубина сезонного промерзания-оттаивания грунтов определяется по [10]. Глубина сезонного промерзания торфа – 1,9 м, суглинка мягкопластичного – 3,5 м, песка – 3,5 м, сезонного оттаивания торфа – 1,3 м, суглинка мягкопластичного – 2,7 м, песка – 3,0 м.

Методика инженерно-геологических исследований

Подготовительные полевые буровые работы проводились ОАО «ТомскНИПИнефть» [4], лабораторные исследования свойств грунтов – в стационарной аккредитованной лаборатории исследований грунтов АО «ТомскНИПИнефть» и в лаборатории грунтоведения и механики грунтов кафедры ИГМСД ТГАСУ.

¹ ГОСТ 20522–2012. Методы статистической обработки результатов испытаний. Москва: Стандартинформ, 2013. 20 с.

На подготовительном этапе собиралась необходимая информация о районе исследований по имеющимся фондовым материалам. Проводились инженерно-геологические рекогносцировочные наблюдения и описания местности в целом и на отдельных точках, характеризующих проектируемую автомобильную дорогу.

Полевой этап включал в себя работы по бурению скважин, термометрические исследования, полевые испытания прочности грунтов на болотных массивах, испытания грунта методом статического зондирования, а также лабораторные работы.

Буровые работы сопровождались отбором проб грунта нарушенной и ненарушенной структуры (монолиты и объемные кольца) для последующего определения их состава, состояния и физико-механических свойств.

Грунты ненарушенной структуры, монолиты, отбирались, упаковывались, транспортировались и хранились в соответствии с ГОСТ 112071–2014² (рис. 7). Образцы мерзлых грунтов перевозились в специальных термоконтейнерах и хранились в холодильных камерах.



Рис. 7. Отобранный монолит
Fig. 7. Selected monolithic soil

По образцам грунтов нарушенной и ненарушенной структуры определялись: гранулометрический состав по ГОСТ 12536–2014³ ареометрическим методом (рис. 8). Естественная влажность грунтов определялась методом высушивания до постоянной массы, влажность на границе текучести – методом балансного конуса, влажность на границе раскатывания – методом раскатывания в жгут по ГОСТ 5180–2015⁴ (рис. 9).

² ГОСТ 12071–2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Москва: Стандартинформ, 1915. 14 с.

³ ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ, 2019. 23 с.

⁴ ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Стандартинформ, 2019. 23 с.



Рис. 8. Установка для определения гранулометрического состава грунта
Fig. 8. Installation for grain size distribution estimation



Рис. 9. Определение влажности проб грунта термостатно-весовым методом
Fig. 9. Determination of soil moisture by thermostatic weight method

По образцам грунтов ненарушенной структуры определялась плотность методом режущего кольца по ГОСТ 5180–2015 с расчетом пористости, коэффициентов пористости и водонасыщения, прочностных и деформационных характеристик (удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль деформации) (рис. 10).



Рис. 10. Определение плотности грунта

Fig. 10. Determination of soil density

Методом совмещенного определения физических характеристик мерзлых грунтов определялись плотность мерзлого грунта, суммарная влажность и относительная осадка оттаивающего грунта. Показатели льдистости и степени заполнения пор льдом и незамерзшей водой определялись расчетными методами по ГОСТ 12248⁵.

По относительной деформации морозного пучения, согласно выполненным лабораторным определениям степени пучинистости грунтов по ГОСТ 28622⁶, в соответствии с п. Б.2.19 ГОСТ 25100⁷, грунты в слое сезонного промерзания-оттаивания:

- ИГЭ-540, ИГЭ-м540 – слабопучинистые;
- ИГЭ-340 – сильнопучинистые;
- ИГЭ-350, ИГЭ-м350 – чрезмерно пучинистые.

В соответствии с [2, табл. В.6], по степени пучинистости грунты подразделяются:

- на песок мелкий (ИГЭ-540, ИГЭ-м540) – слабопучинистые – II группа;
- суглинок легкий (ИГЭ-340) – сильнопучинистые – IV группа;
- суглинок легкий (ИГЭ-350, ИГЭ-м350) – чрезмерно пучинистые – V группа.

Присутствие глинистых грунтов в слое сезонного промерзания-оттаивания (деятельный слой) обуславливает их сезонное пучение. Для суглинистых грунтов прогноз процесса пучения заключается в определении прогнозной влажности порога пучения по формуле В.А. Кудрявцева [5]:

$$W_{п.п} = W_n + n(W_{кр} - W_n),$$

где $W_{кр} = 0,91W_n$; W_n – полная влагоемкость, д. е.; $W_p = e/ps$, д. е.; W_n – влажность за счет незамерзшей воды, д. е.; $n = 0,7$ (коэффициент, зависящий от континентальности климата).

⁵ ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. Москва: Стандартинформ, 2012. 84 с.

⁶ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. Москва: Стандартинформ, 2013. 9 с.

⁷ ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ, 2020. 41 с.

В слое сезонного промерзания глинистые грунты представлены суглинками (ИГЭ-м350). Расчет влажности порога пучения грунтов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Влажность порога пучения грунтов слоя сезонного протаивания

Table 2

Moisture threshold of soil heaving

ИГЭ	W_{tot} , д. е.	e	W_n , д. е.	$W_{кр}$, д. е.	W_n , д. е.	n	$W_{п.п.}$, д. е.
м350	0,281	0,78	0,287	0,261	0,07	0,7	0,204

Пучение грунтов в слое сезонного промерзания будет происходить тогда, когда их влажность превысит значение влажности порога пучения.

По результатам выполненных инженерно-геологических исследований установлены показатели физических свойств грунтов для территории проектирования автомобильной дороги, приведенные в табл. 3–5.

Таблица 3

Физические свойства глинистых грунтов

Table 3

Physical properties of clay soil

Грунт	Естественная влажность, %	Плотность, г/см ³			Число пластичности, %	Пористость, %	Максимальная молекулярная влагоемкость
		твердых частиц	мерзлого грунта	скелета мерзлого грунта			
Супеси	15–39	2,67	1,92	1,54	6	43	9
Суглинки легкие	17–215	2,70	1,65	1,18	8	56	12

Таблица 4

Физические свойства и естественная влажность песчаных грунтов

Table 4

Physical properties and natural moisture of sandy soil

Пески	Естественная влажность, %	Плотность, г/см ³			Пористость, %	Коэффициент пористости	Коэффициент фильтрации, м/сут
		твердых частиц	мерзлого грунта	скелета мерзлого грунта			
Мелкие	9–34	2,65	1,73	1,43	46	0,86	2,6
Пылеватые	5–98	2,65	1,73	1,44	44	0,86	1,4

Таблица 5

Средние значения показателей физических свойств мерзлых грунтов

Table 5

Average physical properties of permafrost soil

Наименование показателей	Индекс	Ед. изм.	Суглинки	Супеси
Суммарная влажность	W_{tot}	д. е.	4,75	0,2
Влажность за счет незамерзшей воды	W_w	д. е.	1,75	0,08
Плотность скелета мерзлого грунта	$\rho_{d,m}$	г/см ³	0,18	1,71
Плотность скелета талого грунта	$\rho_{d,tm}$	г/см ³	0,19	1,74
Объемная теплоемкость мерзлого грунта	C_f	Дж/(м ³ ·°C)10 ⁻⁶	2,76	2,64
Объемная теплоемкость талого грунта	C_{th}	Дж/(м ³ ·°C)10 ⁻⁶	4,11	3,11
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта	λ_f	Вт/(м·°C)	0,97	1,66
Коэффициент теплопроводности талого грунта	λ_{th}	Вт/(м·°C)	0,88	1,45
Температура начала замерзания грунта	T_{bf}	°C	-0,13	-0,3

Рекомендуемые к проектированию значения прочностных и деформационных характеристик грунтов представлены в табл. 6.

Таблица 6

Прочностные и деформационные характеристики грунтов

Table 6

Strength and strain soil parameters

ИГЭ	Угол внутреннего трения ϕ , град	Сцепление C , кПа	Модуль деформации E , МПа
350	21	21	21
m350	21	13	20
540	32	3	31

Мерзлые грунты обладают высокими прочностными свойствами. При сохранении их в мерзлом состоянии эти грунты будут надежным основанием для земляного полотна.

**Конструктивные особенности проектирования земляного полотна
в условиях многолетнемерзлых грунтов**

Северо-Комсомольское месторождение расположено в I ДКЗ на границе северной I_1 и южной I_3 подзон (см. рис. 6). Однако нельзя рассматривать границы жесткими, поскольку как в одну, так и в другую сторону более чем на 100 км

возможно отступление от линии границ на карте. Поэтому, как показали инженерно-геологические изыскания, на участке отвода промышленной автомобильной дороги, соединяющей кустовую площадку № 11 с автодорогой площадки № 10, присутствуют участки, характерные для северной и южной подзон.

В процессе проектирования земляного полотна необходимо руководствоваться следующими принципами [12]:

1. На участках с мерзлотой сливающегося типа земляное полотно проектировать по первому принципу, который предусматривает обеспечение поднятия верхнего горизонта ММГ не ниже подошвы насыпи и сохранение его на этом уровне в течение всего периода эксплуатации дороги. При этом надо иметь в виду, что поднятие ММГ до подошвы основания насыпи или несколько выше происходит не по всей площади ее основания. В данном случае необходимо решать вопрос сохранения в мерзлом состоянии части основания, расположенной под откосом.

2. На участках с мерзлотой несливающегося типа земляное полотно проектируют по третьему принципу, который предусматривает предварительное оттаивание островной мерзлоты путем расчистки полосы отвода дороги с оставлением на год, осушением и дальнейшим строительством по принципу второй ДКЗ.

Наличие на участке проектирования мерзлых легких суглинков (М350) позволяет применить, как вариант в проектировании конструкции земляного полотна по первому принципу, мерзло-комковатый разрыхленный грунт, сохраняемый в мерзлом состоянии во время эксплуатации [14]. Одним из условий сохранения грунта насыпи в мерзлом состоянии является его гидроизоляция. В качестве гидроизоляции в данном случае может быть использована обойма из полиэтиленовой рулонной пленки [15], стабилизированной сажей. Кроме того, в результате воздействия тепловых потоков со стороны оттаявшего деятельного слоя наблюдается оттаивание основания насыпи у ее подошвы и, как следствие, просадка. В этом случае необходимо устраивать теплоизоляцию на поверхности грунта рядом с подошвой насыпи. Для сохранения нижней части насыпи в мерзлом состоянии в качестве теплоизолятора на сегодняшний день, как правило, применяют торф, поскольку он достаточно широко распространен и дешев. Однако торф в значительно большей степени, чем другие грунты, подвержен криогенному растрескиванию с образованием в грунте температурных напряжений, превышающих предел прочности грунта на разрыв, что может привести к разрушению всей конструкции. В настоящее время в качестве теплоизолятора может быть применен пенопласт, используемый в дорожном строительстве и обеспечивающий как теплозащиту, так и прочность [16].

При конструировании насыпи следует учитывать наличие макропор в мерзло-комковатом ядре. При уплотнении мерзлого комковатого глинистого грунта происходит более плотная упаковка комьев, однако разрушению они поддаются мало, поэтому образование макропор можно считать практически неизбежным. Известно, что при отрицательных температурах и взаимодействии мерзлого грунта с воздухом происходит сублимация порового льда, иссушение поверхности мерзлого грунта и перенос влаги в виде пара в более холодные области грунта. Для исключения негативного влияния паропереноса

желательно использовать мерзло-комковатый грунт с добавлением сыпучемерзлого грунта (до 30 % по объему) по всей высоте мерзлого ядра насыпи.

Варианты конструкций земляного полотна с использованием местного комковато-мерзлого грунта в нижней части насыпи без его оттаивания представлены на рис. 11. Теплоизолирующая часть тепло- и гидроизолирующей прослойки может иметь различное конструктивное решение и устраиваться из торфа либо пенопласта или из торфа и пенопласта. Требуемая эффективность тепло- и гидроизолирующей прослойки зависит от ее конструкции, включая толщины слоев и термоизолирующих материалов и сочетания этих слоев. Требуемая толщина тепло- и гидроизолирующей прослойки определяется для конкретных высот насыпей по теплотехническому расчету.

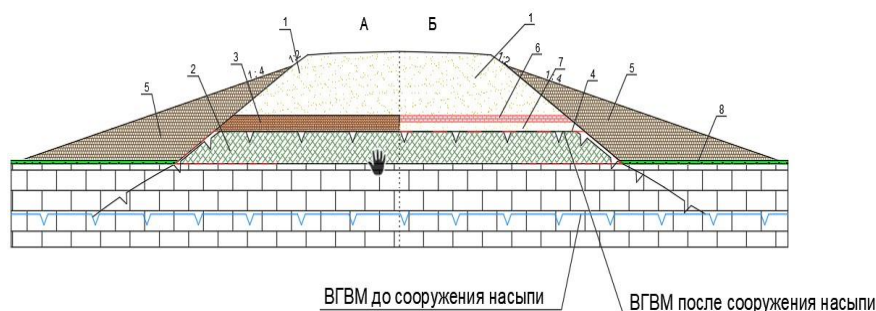


Рис. 11. Конструкции насыпи с ядром из мерзло-комковатого грунта:

1 – песчаный грунт; 2 – мерзло-комковатый грунт; 3 – торф уплотненный; 4 – полубойма из гидроизолирующего материала; 5 – теплоизоляционный слой из торфа; 6 – пенопласт; 7 – песчаный выравнивающий слой; 8 – мохорастительный покров

Fig. 11. Embankment structures with frozen lumpy soil:

1 – sandy soil; 2 – frozen lumpy soil; 3 – compacted peat; 4 – waterproof material semi-holder; 5 – heat-insulating peat layer; 6 – foamed plastic; 7 – sandy levelling layer; 8 – moss-vegetation cover

Расчет необходимой толщины плит теплоизолирующего слоя в насыпи для недопущения под ним морозобойного расстрескивания грунтов мерзло-комковатого ядра осуществляется подбором из условия недопущения превышения максимальной амплитуды температуры грунта под слоем плит пенопласта (A_{\min}) ее максимально допустимого значения по условию морозобойного растрескивания (A_{cr}). Ориентировочные значения A_{cr} для мерзлых грунтов: для песка $w = 0,15-0,22A_{cr} = -(18-25)^\circ\text{C}$, для суглинистого грунта $w = 0,25-0,45A_{cr} = -(14-20)^\circ\text{C}$, для мерзлых торфов $w = 3,5-5,0A_{cr} = -(12-15)^\circ\text{C}$.

Расчет A_{\min} проводится по программе (см. ниже), где введены обозначения: h_i – толщина i -го слоя в насыпи (i отсчитывается сверху вниз); λF_i и cF_i – коэффициенты теплопроводности и теплоемкости i -го слоя; T_k – период k -й гармоники колебаний температуры воздуха: годовой ($k = 1$), 11-суточной ($k = 2$), суточной ($k = 3$); $A0_k$ – полуамплитуды k -й гармоники колебаний температур воздуха, принимаются либо по данным изысканий, либо $A0_1$ (среднемесячная температура воздуха самого холодного месяца) – из справочников по

климату, $A_{02} = 4 \text{ К}$, $A_{03} = 6 \text{ К}$; $A_{\min 0}$ – минимальная температура воздуха (абс. значение, °С) В табл. 7 и 8 приведены средние значения показателей свойств грунтов для расчета нормативных глубин промерзания (протаивания) и расчетная нормативная глубина оттаивания-промерзания.

Таблица 7

**Средние значения показателей свойств грунта
для расчета нормативных глубин промерзания (протаивания) грунтов**

Table 7

Average soil parameters for standard freezing/thawing depth

Показатели	Индекс	Ед. измерения	M110, 110	M350 350	M540, 540
Суммарная влажность	W_{tot}	д. е.	3,59	0,16	0,22
Влажность за счет незамерзшей воды	W_w	д. е.	1,29	0,06	0
Плотность скелета мерзлого грунта	$\rho_{d,f}$	г/см ³	0,23	1,80	1,64
Плотность скелета талого грунта	$\rho_{d,th}$	г/см ³	0,24	1,81	1,65
Объемная теплоемкость мерзлого грунта	C_f	Дж/(м ³ ·°С)10 ⁻⁶	2,7	2,3	2,2
Объемная теплоемкость талого грунта	C_{th}	Дж/(м ³ ·°С)10 ⁻⁶	4,0	2,9	2,8
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта	λ_f	Вт/(м·°С)	1,19	1,67	2,74
Коэффициент теплопроводности талого грунта	λ_{th}	Вт/(м·°С)	0,71	1,45	2,42
Температура начала замерзания грунта	T_{bf}	°С	-0,13	-0,4	-0,07

Таблица 8

Расчетная нормативная глубина оттаивания-промерзания грунтов

Table 8

Theoretical standard freezing/thawing depth

Показатели	Индекс	Ед. измерения	M110, 110	M350 350	M540, 540
Продолжительность периода отрицательных температур [13]	$t_{f,m}$	ч	5448	5448	5448
Расчетный период положительных температур [10]	$t_{th,c}$	ч	3312	3312	3312
Теплота замерзания грунта [10]	$L_{\gamma,f}$	Дж/м ³ ·10 ⁵	1,79	0,606	1,208
Теплота таяния грунта [10]	$L_{\gamma,th}$	Дж/м ³ ·10 ⁵	1,88	0,613	1,216
Нормативная глубина сезонного промерзания грунта (талый) [10]	$d_{f,n}$	м	1,9	3,5	3,5
Нормативная глубина сезонного оттаивания грунта (мерзлый) [10]	$d_{th,n}$	м	1,3	2,7	3,0

В приведенном ниже примере использован следующий разрез (сверху вниз): дорожная одежда 0,34 м; песок 0,60 м; плита пенопласта толщиной h_P ; ниже – мерзло-комковатый грунт. В тексте принят начальный вариант $h_P = 0,1$ м. В результате подбора получена зависимость значений h_P , предотвращающих растрескивание грунта насыпи под плитами пенопласта от амплитуды $A0_1$, являющейся средней температурой воздуха самого холодного месяца. Полученные результаты приведены в (табл. 9) после программы расчета.

$$A0_k := \begin{cases} (-23 \cdot K) & \text{if } k = 1 \\ (4 \cdot K) & \text{if } k = 2 \\ (6 \cdot K) & \text{if } k = 3 \end{cases} \quad i := 1..N-1 \quad \omega_k := \frac{\pi}{T_k} \quad \mu_{i,k} := \sqrt{\frac{\omega_k \cdot c F_{i+1}}{2 \cdot \lambda F}} \quad m_i := \frac{\lambda F_i}{\lambda F_{i+1} \cdot h_i}$$

$$Amin_i := \sum_{k=1}^3 \prod_{j=1}^i \frac{m_j}{m_j + \mu_{j,k}} \cdot |A0_k| \quad Amin_0 := \sum_{k=1}^3 |A0_k| \quad Amin_0 = 30K$$

28.8K
27.63
10.5
8.47
6.20
5.01

Таблица 9

**Зависимость толщины слоя из плит пенопласта (h_P)
от средней температуры воздуха самого холодного месяца ($A0_1$)**

Table 9

Foamed plastic thickness h_P vs. average air temperature $A0_1$ of the coldest month

$A0_1, ^\circ\text{C}$	$h_P, \text{м}$
-40	0,12
-35	0,09
-30	0,07
-25	0,04
-20	0,02
-15	0,002

При проектировании земляного полотна в условиях I ДКЗ по первому принципу горизонт ММГ поднимается в центральной части насыпи под ее подшву и опускается под ее откосом. Оттаивание многолетнемерзлых грунтов под откосами насыпи происходит потому, что мохоторфяной покров, являющийся естественным теплоизолятором, сжимается, а толщина слоя грунта над ним недостаточна, чтобы компенсировать термическое сопротивление мохоторфа. Торф может быть теплоизолятором только в уплотненном состоянии, когда содержит большое количество воздуха и воды. Пузырьки воздуха одинаково препятствуют теплопередаче в летнее и зимнее время года, вода же

способствует понижению температуры грунтов основания, поскольку теплопроводность льда в 4 раза выше теплопроводности воды. В зимнее время лед, имея высокую теплопроводность, способствует охлаждению грунтов, а в летнее время вода с более низкой теплопроводностью препятствует их растеплению.

В силу этих причин основание под откосом насыпи является ее «слабым местом», независимо от ее высоты [17]. Вследствие просадок оттаявших грунтов обычно наблюдается деформация откоса: в нижней его части происходит сдвиг, в верхней части откоса и в теле насыпи образуются вертикальные трещины (так называемые трещины отседания). Затем происходит обрушение верхней части откоса и постепенное разрушение насыпи (рис. 12).

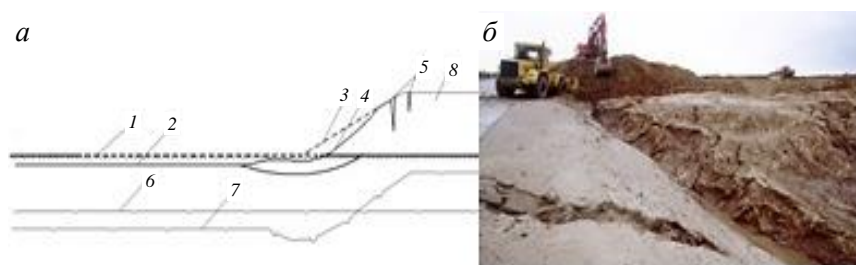


Рис. 12. Деформация насыпи в результате просадки оттаявшего основания под ее откосом (а): 1 – поверхность до сооружения насыпи; 2 – поверхность после сооружения; 3 – поверхность откоса насыпи по проекту; 4 – то же после протаивания основания; 5 – трещины в теле насыпи; 6 – ВГВМ до сооружения насыпи; 7 – то же после сооружения насыпи; 8 – насыпь; разрушение земляного полотна на промышленной дороге в районе газового месторождения «Заполярье» (б)

Fig. 12. Embankment deformation after setting of thawed subgrade (a): 1 – surface before embankment construction; 2 – surface after embankment construction; 3 – embankment slope surface according to the project; 4 – after subgrade thaw; 5 – cracks in the embankment; 6 – before embankment construction; 7 – after embankment construction; 8 – embankment; subgrade failure nearby the Zapolyarnoye gas field (b)

На устойчивость насыпи также влияет нарушение в процессе строительства мохорастительного покрова вдоль насыпи в зоне, примыкающей к ее подошве: тепловые потоки беспрепятственно перемещаются к основанию насыпи, способствуя повышению температуры многолетнемерзлых грунтов. Кроме того, в результате деградации мерзлоты происходит вытаивание льда, что может привести к обводнению сооружения. Если влага, присутствующая в торфе, способствует сохранению мерзлоты, то вода, стоящая около насыпи, вызывает обратный эффект: в летнее время под воздействием солнечной радиации вода нагревается и отепляет грунт. Если же вдоль насыпи рельеф имеет уклон, то достаточно часто наблюдается размыв с образованием канав, разрушающих откосы (рис. 12, б).

Поскольку в районе проложения трассы автомобильной дороги присутствуют грунты сильно и чрезмерно пучинистые и, соответственно, чрезмерно просадочные (относительная осадка 0,6–1,0 [2]), необходимо уменьшить талую зону откосной части насыпей до минимально возможных размеров укреплени-

укрепления откосной части насыпи с применением комплексного метода, сочетающего теплоизоляцию и армирование, представлен на рис. 13.

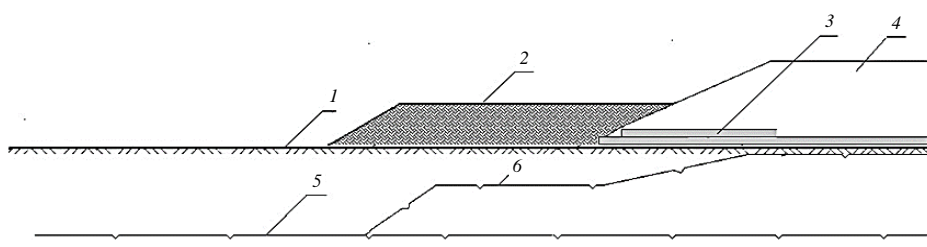


Рис. 13. Применение теплоизолирующего материала для уменьшения глубины оттаивания основания земляного полотна, сложенного сильнопросадочным грунтом при оттаивании:

1 – поверхность до сооружения насыпи; 2 – берма (растительный грунт или торф, закрепленный геосинтетическим материалом); 3 – теплоизолятор; 4 – насыпь; 5 – ВГММГ до сооружения насыпи; 6 – то же после сооружения насыпи

Fig. 13. Heat-insulating material for thawing depth reduction of the subgrade composed of highly shrinkable soil:

1 – surface before embankment construction; 2 – vegetative soil or peat fixed with geosynthetic material; 3 – heat insulator; 4 – embankment; 5 – before embankment construction; 6 – after embankment construction

Для предотвращения размывов вдоль насыпи предлагается закрепление растительного грунта при помощи геосинтетического материала в виде бермы и посева трав. Использование неуплотненного торфа толщиной не менее 0,3 м вместо растительного грунта создаст теплоизоляционный эффект, и берма будет выполнять две функции: теплоизоляции и закрепления грунта.

Рекомендации

1. На участках трассы автомобильной дороги до кустовой площадки № 11 со сливающейся мерзлотой земляное полотно следует проектировать по первому принципу, предусматривающему обеспечение верхнего горизонта многолетнемерзлых грунтов не ниже подошвы насыпи и с сохранением его в течение периода эксплуатации дороги. Строительство автомобильной дороги вести только в зимний период из несцементированных грунтов.

2. На участках трассы автомобильной дороги до кустовой площадки № 11 с несливающейся мерзлотой земляное полотно проектировать по третьему принципу, предусматривающему расчистку полосы отвода дороги с сохранением ее в течение не менее года для опускания островной мерзлоты. Земляное полотно автомобильной дороги проектировать по правилам II дорожно-климатической зоны с соблюдением типа местности по степени увлажнения.

3. Присутствие по трассе автомобильной дороги мерзлых суглинистых грунтов позволяет применять в основании земляного полотна мерзло-комковатые грунты с обязательным устройством гидротеплоизолирующих слоев.

4. Во избежание появления в верхней части откоса и в теле насыпи трещин отседания, приводящих к обрушению откоса и дальнейшему разрушению насыпи, необходимо уменьшать талую зону откосной части насыпей до ми-

нимально возможных размеров укреплением подошвы откоса земляного полотна как снаружи, так и внутри теплоизолирующими материалами.

5. Не допускать рекультивации земель в зоне строительства дороги во избежание эрозии почвенного покрова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *География Ямала* // Правительство ЯНАО : [сайт]. URL: <https://yanao.ru/region/obshchie-svedeniya/#geography> (дата обращения: 24.10.2023).
2. *СП 34.13330.2021*. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02–85. Москва : Минстрой России, 2021. 151 с.
3. *Ямало-Ненецкий автономный округ* // Знание : Российское общество: [сайт]. URL: <https://znanierussia.ru/articles/> (дата обращения: 24.10.2023).
4. *Обустройство кустовой площадки № 11 Северо-Комсомольского месторождения* : технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной, рабочей документации. АО «ТомскНИПИнефть». Томск, 2018. 258 с.
5. *Основы мерзлотного прогноза* при инженерно-геологических исследованиях / под ред. В.А. Кудрявцева. Москва : Изд-во МГУ, 1989. 143 с.
6. *Геофизические методы исследования криолитозоны*. Москва : Изд-во МГУ, 2007. 272 с.
7. *Геокриология СССР*. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова [и др.]. Москва : Недра, 1989. 454 с.
8. *СП 34.13330.2021*. Свод правил. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02–85*. Москва : Минстрой России, 2021. 151 с.
9. *СП 115.13330.2016*. Свод правил. Геофизика опасных природных воздействий. Москва : Минстрой России, 2016. 36 с.
10. *СП 25.13330.2020*. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СНиП 2.02.04–88. Москва : Минстрой России, 2022. 153 с.
11. *СП 86.13330.2022*. СНиП III-42–80* Магистральные трубопроводы. Москва : Минстрой России, 2022. 147 с.
12. *СП 313.1325800.2017*. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. Москва : Минстрой, 2017. 133 с.
13. *СП 131.13330.2020*. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01–99*. Москва : Минрегион России, 2021. 116 с.
14. *Методические рекомендации по проектированию и строительству земляного полотна в зоне вечной мерзлоты с использованием разрыхленных мерзлых грунтов, сохраняемых в мерзлом состоянии во время эксплуатации (для опытно-экспериментального строительства)*. Москва : Минтранс России, 2003. 31 с.
15. *ГОСТ 10354–82*. Пленка полиэтиленовая. Москва : Стандартинформ, 2007. 82 с.
16. *Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Ведерникова М.А., Емельянова Л.В.* Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 2. С. 84–89.
17. *Анализ температурного режима вечномерзлых грунтов оснований мостовых опор в условиях полигона на разъезде 15 и на мостах ж. д. линии Обская-Бованенково. Этап 1. Исследование охлаждающего влияния термоопор* // Отчет о научно-исследовательской работе ОАО ЦНИИС, Центральная лаборатория инженерной теплофизики. Москва, 2010.

REFERENCES

1. Yamal geography Available: <https://yanao.ru/region/obshchie-svedeniya/#geography> (accessed October 24, 2023). (In Russian)
2. SP 34.13330.2021. Automobile roads. Moscow: Minstroy Rossii, 2021. 151 p. (In Russian)
3. The Yamal-Nenets Autonomous District. Available: <https://znanierussia.ru/articles/> (accessed October 24, 2023). (In Russian)
4. Development of cluster pad 11 in the Severo-Komsomolsk field: Technical report. AO "TomskNIPIneft". Tomsk, 2018. 258 p. (In Russian)

5. Kudryavtsev V.A. (Ed.) Basics of permafrost prediction in geotechnical studies. Moscow: MSU, 1989. 143 p. (In Russian)
6. Geophysical methods in cryogenic territory investigation. Moscow: MSU, 2007. 272 p. (In Russian)
7. Ershov E.D., et al. (Eds.) Geocryology of the USSR. Western Siberia. Moscow: Nedra, 1989. 454 p. (In Russian)
8. SP 34.13330.2021. Code specification. Motorways. Moscow: Minstroï Rossii, 2021. 151 p. (In Russian)
9. SP 115.13330.2016. Code specification. Geophysics of natural hazards. Moscow: Minstroï Rossii, 2016. 36 p. (In Russian)
10. SP 25.13330.2020. Foundations and footings on permafrost soils. Moscow: Minstroï Rossii, 2022. 153 p. (In Russian)
11. SP 86.13330.2022. SNiP III-42–80* Main pipelines. Moscow: Minstroï Rossii, 2022. 147 p. (In Russian)
12. SP 313.1325800.2017. Automobile roads in permafrost areas. Design and construction rules. Moscow: Minstroï, 2017. 133 p. (In Russian)
13. CP 131.13330.2020. Code specification. Construction climatology. Moscow: Minregion Rossii, 2021. 116 p. (In Russian)
14. Methodological recommendations for design and construction of earthwork in permafrost zone using loosened permafrost soils in permafrost state during operation (for experimental construction). Moscow: Mintrans Rossii, 2003. 31 p. (In Russian)
15. GOST 10354–82. Polythene film. Moscow: Standartinform, 2007. 82 p. (In Russian)
16. Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Vedernikova M.A., Emel'yanova L.V. Synthetic thermal insulators for railway embankments in permafrost conditions. Kriosfera Zemli. 2008; 12 (2): 84–89. (In Russian)
17. Temperature analysis of permafrost soils of bridge piers bases on road 15 and bridges of the Obskaya–Bovanenkovo railway line. Stage 1. Cooling effect of thermal supports. Moscow, 2010. (In Russian)

Сведения об авторах

Бычков Олег Анатольевич, канд. геол.-мин. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, jarilo1962@yandex.ru

Пушкарева Галина Вениаминовна, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kedrik42@mail.ru

Authors Details

Oleg A. Bychkov, PhD, A/professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, jarilo1962@yandex.ru

Galina V. Pushkareva, PhD, A/professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kedrik42@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 28.09.2023
Одобрена после рецензирования 16.10.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 28.09.2023
Approved after review 16.10.2023
Accepted for publication 09.11.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 218–232.

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 (6): 218–232.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.168:625.861: 504.17

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-218-232

EDN: WLQJTT

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА КОНЦЕПЦИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОГО СЕКТОРА

Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич

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

Аннотация. Рассмотрена возможность развития дорожно-строительной отрасли путем использования инструментов концепции устойчивого развития. Проанализировано состояние проблемы устойчивого/зеленого дорожного строительства в России и за рубежом.

Цель работы – оценка эколого-экономического потенциала новых технологий как ресурса устойчивого развития дорожного строительства.

Задачи исследования:

- выполнить критический анализ современного состояния и перспектив реализации принципов устойчивого развития применительно к дорожному строительству;
- выявить положительные и отрицательные последствия реализации принципов устойчивого развития в дорожно-транспортной отрасли и сделать заключение о практических возможностях их применения в российских условиях.

Методика и методы исследования. Были использованы общенаучные методы: анализ и синтез, междисциплинарный синтез, сопоставление, абстрагирование, систематизация, наблюдение, а также визуализация, экспертная оценка, поисковые и статистические методы.

Ключевые слова: автомобильная дорога, устойчивое развитие дорожного строительства, ресурсосбережение, экологическая безопасность

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Оценка эколого-экономического потенциала концепции устойчивого развития как фактора повышения эффективности дорожно-транспортного сектора // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 218–232. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-218-232. EDN: WLQJTT

ORIGINAL ARTICLE

ECOLOGICAL AND ECONOMIC POTENTIAL OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT AS EFFICIENCY INCREASE OF ROAD TRANSPORT SERVICE

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The development of the road construction industry based on the sustainable development concept is considered. The problem of sustainable/green road construction in Russia and abroad is analyzed.

Purpose: The evaluation of the environmental and economic potential of new technologies as a sustainable development of road construction.

Methodology/approach: analysis and synthesis, interdisciplinary synthesis, comparison, abstraction, systematization, observation, visualization, expert assessment, search and statistical methods.

Value: The sustainable development principles for the road construction are analyzed; positive and negative consequences of implementing these principles in the road transport industry are identified.

Keywords: highway, sustainable development, road construction, resource conservation, environmental safety

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Ecological and economic potential of sustainable development as efficiency increase of road transport service. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 218–232. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-218-232. EDN: WLQJTT

Введение

Актуальность работы. Дорожное строительство – важнейшая экономическая и социальная составляющая человеческой деятельности, особенно на современном этапе урбанизации. Количественные и качественные показатели состояния сети дорог в стране фактически определяют векторы ее развития. Среди социально-экономических услуг, которые предоставляет дорожно-транспортная отрасль, – обеспечение экономического роста, освоение и опережающее развитие новых территорий, сокращение времени в пути, снижение транспортных расходов, обеспечение доступа к разнообразным критически важным товарам и услугам, предоставление новых возможностей трудоустройства [1].

В последние 40 лет непрерывно растет интерес к реализации принципов устойчивого развития городской среды, что связано с высокими темпами урбанизации, сопровождающейся стремительным ростом загрязнения окружающей среды [1, 2, 3, 4].

В градостроительной сфере концепция устойчивого развития реализуется в теории и практике энерго- и ресурсосбережения, повышения комфортности среды обитания горожан, природоохранной деятельности, нацеленной на биосферную совместимость зданий и сооружений, в обновлении нормативно-правовой базы природопользования [5, 6]. Назрела объективная необходимость подключения дорожно-строительной сферы к этим направлениям устойчивого развития.

Целью работы является оценка эколого-экономического потенциала новых технологий как ресурса устойчивого развития дорожного строительства.

Задачи исследования:

- выполнение критического анализа современного состояния и перспектив реализации принципов устойчивого развития применительно к дорожному строительству;

- выявление положительных и отрицательных последствий реализации принципов устойчивого развития в дорожно-транспортной отрасли и вывод о практических возможностях их применения в российских условиях.

Методика и методы исследования. В статье использованы общенаучные методы: анализ и синтез, междисциплинарный синтез, сопоставление, абстрагирование, систематизация, наблюдение, а также визуализация, экспертная оценка, поисковые и статистические методы. Сделан выбор и выполнен анализ научной литературы, отражающей вопросы устойчивого развития в строительной сфере, из более 250 источников, находящихся в открытом доступе, посвященных разным точкам зрения на использование терминологии и принципов устойчивого развития в экономике и социальной политике, эколого-экономическим проблемам градостроительства, ресурсосберегающего строительного материаловедения, «зеленых» стандартов и технического законодательства (их разработки, совершенствования, применения).

Эколого-экономический потенциал новых технологий как ресурс устойчивого развития дорожного строительства

Еще 40–50 лет назад основные ограничения, влиявшие на проекты строительства новых автомагистралей, были главным образом техническими и экономическими. При проектировании и строительстве автомобильной дороги не нужно было беспокоиться о том, как она повлияет на окружающую природную среду (ОПС). Однако уже в 1970-е гг. угрозы состояния воздушной, водной, почвенной геосфер стали очевидны; были получены достоверные доказательства прямой взаимосвязи качества ОПС и здоровья населения.

Свой вклад, причем существенный, в негативное воздействие на ОПС вносит и дорожно-транспортный комплекс. Новое строительство, реконструкция, ремонт и эксплуатация дорог вызывают серьезные негативные краткосрочные и долгосрочные последствия для ОПС, такие как шумовое воздействие, выбросы парниковых газов, фрагментация среды обитания, прямые потери среды обитания (флоры и фауны), изменение качества прилегающих экосистем, местные гидрогеологические и почвенно-эрозионные нарушения и др. [7, 8, 9, 10].

Возникшая как результат философского осмысления, экономических расчетов, анализа и обобщения накопленных естественно-научных фактов о динамике загрязнения объектов ОПС, глобального моделирования концепция устойчивого развития (КУР) явилась ответом на растущее осознание того, что нынешние уровни и формы экономической деятельности угрожают системам жизнеобеспечения планеты.

В формулировке, данной в широко известном отчете «Наше общее будущее» комиссии ООН под руководством Гру Харлем Брутланд (1987 г.),

термин sustainable development – устойчивое развитие – означает такое, при котором удовлетворение потребностей нынешнего поколения людей не лишает такой возможности будущих поколений.

В основу КУР заложены четыре измерения: социум, технологии, экология, экономика. Их баланс определяет состояние динамического равновесия и возможность самоподдерживаемого развития (более точный по смыслу перевод на русский язык термина sustainable development).

Интерес к проблематике КУР не ослабевает многие годы. В ряде случаев как синонимы используются понятия «экологическая», «зеленая», «устойчивая», «биосферно-совместимая» экономика, ее практические и концептуальные аспекты. Эти же прилагательные характеризуют экологическую и экономическую целесообразность применительно к технологиям, материалам, зданиям, дорожно-транспортным сооружениям.

Вслед за авторами работ [11, 12] выделим и переформулируем применительно к отечественным реалиям основные принципы устойчивого развития, выделенные в аспекте дорожного строительства (УРДС):

- минимизация использования невозобновляемых источников энергии и природных ресурсов;
- минимизация негативного воздействия на окружающую среду;
- использование и развитие устойчивых технологий;
- экономическая оценка воздействия дорожных проектов;
- компромисс между затратами и выгодами в триаде интересов бизнеса, общества и государства.

Преимущества тех или иных вариантов и комбинаций этих принципов действуют как доступные инструменты для реализации УРДС, в зависимости от региональных условий.

Из вышесказанного следует вывод о миссии инженера-дорожника (специалиста, бакалавра, магистра). Она заключается в объединении науки, технологий, накопленного опыта и инноваций в строительстве автомагистралей с целью разработки более устойчивого дорожного проекта и его реализации.

Устойчивые транспортные системы в общих чертах – это системы, которые принимают и применяют на практике фундаментальные принципы социальной, экономической и экологической устойчивости. Они удовлетворяют потребности людей в безопасном передвижении, а также защищают окружающую среду и поддерживают социальное равенство, т. е. общедоступны. В 1998 г. Международной организацией экономического сотрудничества и развития разработаны основные руководящие принципы реализации устойчивой транспортной политики (OECD, Guidelines towards Environmentally Sustainable Transport, 2003¹), которые легли в основу программы «Европейская транспортная политика на 2010 год». В этих документах речь идет об устойчивых транспортных системах, основанных на альтернативных видах транспорта, возобновляемых источниках энергии, новых технологиях для экономичного энергопотребления и повышения безопасности [13].

¹ URL: www1.oecd.org/publications/e-book/9702191E

Транспортные средства вместе с дорожной инфраструктурой являются основой экономики и общества. Концепция проектирования автомобильных дорог основывается на понимании, что каждый проект уникален, поскольку учитывает обстановку и характер местности, ценности местного сообщества, потребности и возможности пользователей дорог, безопасность.

Выбор маршрутов, проектирование трассы и расположение перекрестков основываются, прежде всего, на требованиях дорожных стандартов в отношении обеспечения основных функций: доступность, пропускная способность, уровень комфорта, безопасность и время в пути. Возможен ли при этом социально-эколого-экономический компромисс, предполагающий минимизацию ущерба ОПС? По мнению Х. Кассоффа, время для такой возможности пришло, что он и доказывает, основываясь на результатах своего исследования [14].

Ранее нами рассматривались вопросы баланса экологического, социального, экономического компонентов дорожно-транспортной инфраструктуры как системы [1, 15], был обоснован вывод, что комплексное развитие дорожного строительства служит функциональной основой этой системы на всех стадиях жизненного цикла: проектирования, строительства, эксплуатации автомобильной дороги. Анализ и обобщение результатов теоретических исследований и практического опыта (главным образом зарубежного) [2, 11, 12] позволили выделить основные критерии проектирования и строительства устойчивой автомагистрали (табл. 1).

Выделенные критерии (сохранение и реабилитация окружающей среды, стратегическое планирование, экологическая безопасность, обеспечение комфорта людей, использование новейших цифровых технологий) апробированы и положительно зарекомендовали себя за рубежом и реализуются, не всегда в полном объеме, в России.

Таблица 1

Критерии проектирования и строительства устойчивой автомагистрали

Table 1

Criteria for design and construction of automobile road

Область приложения критерия	Обоснование критерия	Возможность применения в российских условиях
Сохранение и реабилитация окружающей среды	Сотрудничество и скоординированные действия междисциплинарной команды инженеров-строителей, ландшафтных дизайнеров, проектировщиков, ученых-экологов	Приемлемо, продуктивно для реализации комплексного, системного подхода в проектировании. Препятствием является ведомственная разобщенность специалистов
Стратегическое планирование	Сохранение и улучшение природной и социальной среды через реализацию экологической политики, передового опыта на отдаленную межпоколенческую перспективу	Соответствует экологическому законодательству и действующим нормативам. Уже сделаны первые шаги, и имеется положительный опыт в управлении ландшафтом, проектировании с учетом жизненного цикла автомагистрали

Окончание табл. 1
End of table

Область приложения критерия	Обоснование критерия	Возможность применения в российских условиях
Экологическая безопасность: мониторинг, контроль, оценка	Разработка показателей экологической результативности мероприятий обеспечивает эффективное управление экологической ситуацией. Процедуры и принципы мониторинга – важная часть оценки экологических показателей	Российские показатели разработаны, продолжается их совершенствование, актуализируются новые показатели. Однако методические руководства к их использованию часто носят рекомендательный характер, следовательно, могут не выполняться
Обеспечение комфорта и безопасности для пассажиров, водителей, пешеходов, жителей придорожных домов	Ревизия, обновление на основе компромиссного решения противоречий ведомственных нормативно-правовых документов. Придание документам обязательного, а не рекомендательного статуса	Вопросам безопасности в последние 7 лет уделяется большое внимание государственных структур, ситуация улучшается (по данным Росстата), выполняются нацпроекты «Жилье и городская среда», «Безопасные и качественные дороги»
Использование новейших цифровых технологий	Новые проекты должны создаваться на основе системного подхода	Активно внедряется крупными компаниями, но недоступно мелким региональным организациям. Ощущается нехватка квалифицированных кадров

Белорусские исследователи видят «достижение целей устойчивого развития как совокупный результат развития отдельных отраслей национальной экономики, включая дорожную» [16]. Они выдвинули концепцию, в которой КУР дорожной отрасли реализуется через «использование негаресурсов, под которыми понимаются потенциальные ресурсы, сформированные в результате совершенствования процессов обращения с конечной продукцией за счет рационализации ее потребления, а также с исходными ресурсами за счет оптимизации отдельных стадий производственного и логистического циклов».

Авторами [16] «предложено для оценки влияния дорожного хозяйства на сферы жизнедеятельности человека и, как итог, на устойчивое развитие рассматривать его на мега-, мезо-, макро- и микроуровнях (рис. 1). Эти уровни охватывают все элементы дорожно-хозяйственной системы: проектирование, строительство, содержание и ремонт, производство строительных материалов и изделий».

Предложенная систематизация элементов дорожно-хозяйственной системы, на наш взгляд, является удачной и хорошо коррелирует с выкладками, приведенными в ранее опубликованных работах [1, 15]. Успешная реализация на каждом уровне соответствующих социально-эколого-экономических задач развития является условием УРДС.



Рис. 1. Структурная схема влияния дорожно-строительного комплекса на составляющие устойчивого развития [16]

Fig. 1. Influence of road construction complex on sustainable development [16]

При разработке инструментов практической реализации КУР выделилось направление «зеленые стандарты», получившее распространение в зарубежной строительной сфере (BREEAM, LEED, DGNB) и сравнительно недавно адаптированное к российским реалиям [5, 17]. Потребность в национальных экологических стандартах градостроительства и дорожного строительства очевидна. Вместе с тем их создание тормозится из-за отсутствия единой системы оценки качества проектирования и строительства, неготовности государственных структур и строительных организаций объединить усилия для решения этой большой задачи.

Одной из удачных попыток серьезного, системного подхода к «озеленению» дорожного строительства можно считать зеленый стандарт СТО Автодор 7.1–2013, разработанный для Государственной компании «Российские автомобильные дороги»².

Этот стандарт определяет «минимальные экологические требования к объектам Автодора и устанавливает принципы, методы оценки, критерии, индикаторы для установления степени их соответствия указанным требованиям».

«Требования стандарта направлены на сокращение потребления энергетических ресурсов, использование нетрадиционных, возобновляемых и вторичных энергетических ресурсов, рациональное водопользование, снижение вредных воздействий на окружающую среду в процессе строительства и эксплуатации автомобильных дорог при обеспечении комфортной среды обитания человека и адекватной экономической рентабельности архитектурных, конструктивных и инженерных решений».

² СТО Автодор 7.1–2013. Зеленый стандарт Государственной компании «Автодор». Москва: Автодор, 2013. 61 с.

Кроме вышеупомянутого стандарта, в России введено в обращение множество нормативно-технических документов для применения в дорожном хозяйстве, в том числе касающихся использования новейших технологий, материалов, утилизации отходов. Однако они нередко дублируют друг друга, и многие не используются на практике, как это следует из фактов, приведенных в Отчете счетной палаты РФ «Анализ применения новых, экономически целесообразных, долговечных материалов и технологий при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог общего пользования в 2018–2020 годах»³. Из сделанных экспертами выводов следует, что «наличие системных проблем не позволяет сформировать благоприятную среду для инновационного развития в дорожном хозяйстве». Полностью соответствуют целям УРДС высказанные в Отчете пути решения проблем:

- «обеспечение условий для применения всех доступных технологий и материалов с возможностью выбора наиболее оптимальных решений;
- формирование доступной для всех участников отрасли достоверной информации об эффективности технологий и материалов по качественным и количественным параметрам;
- обеспечение беспрепятственного перехода новых технологий и материалов в статус наилучших технологий и материалов при соответствующем подтверждении их эффективности (потребительские свойства, безопасность, экономичность, долговечность и т. д.)».

Наша страна приняла в свое время обязательства по выполнению ряда международных конвенций и соглашений, что обязывает снизить уже имеющееся и потенциальное негативное воздействие хозяйственной деятельности на окружающую среду. Эффективным механизмом для этого служит внедрение наилучших доступных технологий (НДТ), т. е. таких «технологий производства продукции, выполнения работ, оказания услуг, которые определяются на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности ее применения»⁴. Из определения самого термина НДТ следует важнейшая функция в выполнении целей УРДС.

Условиями для признания НДТ специальными органами сертификации являются:

- «применение малоотходной технологии;
- исключение использования токсичного сырья;
- стимулирование вовлечения в хозяйственный оборот сбросов, выбросов и отходов, образующихся в процессе хозяйственной деятельности;
- наличие сравнимых технологических процессов, производственного оборудования или методов эксплуатации, успешно апробированных на промышленном уровне».

Таким образом, переход предприятия на НДТ требует замены «коричневой» (ресурсо- и энергоёмкой) бизнес-модели, нацеленной на непрерывное увеличение прибыли, на эколого-социально-ориентированную «зеленую» мо-

³ URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/67d/ap67p4spuhjz179h0jbnjtb66pvlptlc.pdf>

⁴ ГОСТ Р 56828.32–2017. Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Методологии идентификации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146588>

дель, в которой экономическая ценность не противоречит социальной и природоохранной, а опирается на них.

Внедрение на предприятиях дорожного хозяйства НДТ началось в РФ недавно и протекает с большими трудностями, что отмечено в Отчете счетной палаты РФ⁵. Среди них выделим: «разобщенный характер проводимых в дорожной отрасли научных исследований; отсутствие государственного органа, отвечающего за создание благоприятных условий для разработки новых технологий и материалов и их последующего применения в дорожном хозяйстве; отсутствие планомерных и систематизированных исследований, официальных опытно-экспериментальных полигонов; отсутствие общего порядка разработки и внедрения новых технологий и материалов для дорожного хозяйства с исчерпывающим перечнем необходимых документов и согласований; исключение новых технологий и материалов из проектной документации по результатам государственной экспертизы; отсутствие мониторинга результатов применения новых технологий и материалов с последующей оценкой их эффективности по качественным и количественным показателям».

В табл. 2 выполнена оценка экологической целесообразности и экономической эффективности мероприятий, которые позволят убедить руководство предприятий дорожного хозяйства ежегодно делать шаги в направлении УРДС. К сожалению, ввиду крайней нестабильности цен на энергоресурсы, сырье и материалы в условиях современной экономической ситуации в России проведение расчетов для получения доказательной базы экономической целесообразности «зеленых» решений для дорожного строительства в численном виде не представляется возможным.

Таблица 2

Основные мероприятия, обеспечивающие природоохранный и экономический эффекты в дорожном строительстве

Table 2

Measures for environmental and economic effects in road construction

Мероприятие	Экологическая целесообразность	Источник экономии
1. Внедрение инновационных технологий строительства	Частичная замена природного сырья на вторичное; улучшение качества и надежности дорог увеличивает межремонтные интервалы	Снижение затрат на закупку сырья, на ремонтные работы при повышении долговечности дорожной инфраструктуры; снижение эксплуатационных затрат
2. Замена устаревшего оборудования на современное энергоэффективное	Экономия углеродных топливных ресурсов; уменьшение количества парниковых газов	Экономия электрической энергии; повышение качества и надежности оборудования
3. Организация своевременного ремонта дорожных покрытий	Экономия природных ресурсов	Экономия средств на мелком ремонте благодаря недопущению глубоких разрушений

⁵ URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/67d/ap67p4spuhjz179h0jbnjtb66pvlptlc.pdf>

Окончание табл. 2
End of table

Мероприятие	Экологическая целесообразность	Источник экономии
4. Повышение качества проектирования	Сохранение ценных природных ландшафтов, видового разнообразия; недопущение деградации почв; снижение загазованности улиц	Получение государством скрытого/косвенного экономического эффекта за счет уменьшения заболеваемости населения
5. Внедрение наилучших доступных технологий (НДТ)	Повышение эффективности производственного экологического контроля на основе новых требований к экологическому нормированию через технологические нормативы	Получение выгодных условий государственной поддержки, повышение имиджа и конкурентоспособности компании
6. Оптимизация нормативно-методической базы по дорожно-транспортному сектору экономики	Изменение статуса нормативно-правовых документов, регламентирующих природоохранную и ресурсосберегающую деятельность, с рекомендательного на обязательный	Упрощение системы экологических согласований, платежей, штрафов

Кратко охарактеризуем такое необходимое условие выполнения целей УРДС, как учет ландшафтных условий при проектировании. Строительство автомагистралей сопровождается изъятием значительных земельных участков, что неизбежно приводит к конфликтам с другими видами землепользования: ограниченным хозяйствованием на особо охраняемых природных территориях, сельскохозяйственным производством. Существует еще один экологический фактор, связанный с нарушениями в биотопе, – утрата/сокращение среды обитания и барьерный эффект, препятствующий перемещению животных, что может привести к изоляции и исчезновению уязвимых видов. Смягчения последствий фрагментации среды обитания можно достичь несколькими способами. Это выбор оптимальных границ, возможность реконструкции, территориальная компенсация в виде другого участка для ареала [11, 18].

Дорожные организации несут ответственность перед местным сообществом, выходящую за рамки строительной деятельности. Этика устойчивого развития предполагает поиск баланса между правами на благоприятные условия существования для людей настоящего и будущих поколений. Принцип равенства между поколениями и внутрив поколенческая справедливость рассматриваются как опоры в фундаменте устойчивого развития [11]. С этической позиции устойчивая автомагистраль должна обеспечивать как повышение качества человеческой жизни, так и защиту окружающей среды. При этом последствия от воздействия дорожной инфраструктуры должны рассматриваться во временных рамках, отмеченных поколениями, а не двумя или тремя десятилетиями.

Американское общество инженеров-строителей (ASCE) признает ведущую роль инженеров в движении по пути устойчивого развития. На них лежит ответственность за обеспечение качества разработки и внедрения в производство инноваций для решения проблем УР. Кодекс этики ASCE требует, чтобы инженеры-строители несли ответственность за окружающую среду при выполнении своих профессиональных обязанностей [11]. Речь идет об одном из самых трудных компромиссов – этическом, призванном сбалансировать технологический процесс строительства, решение экологических проблем и интересы местного сообщества. Например, жителям поселка необходима новая автомагистраль, чтобы иметь возможность выезжать за его пределы, принимать у себя гостей, получать услуги скорой помощи, но в то же время, если трасса пройдет через улицы поселка, значительно ухудшится экологическая обстановка. Возможно, на пути трассы окажется старое кладбище, заброшенное культовое сооружение, ценный для исторической науки артефакт в культурных отложениях, что не было учтено в проекте. В решении социальных и экологических вопросов преимущества и затраты часто неясны, неизмеримы, подлежат обсуждению. Необходимо установить институциональные механизмы и этические принципы, на основе которых будет разрабатываться проект, но для этого общество должно проявить активность [11].

На рис. 2 приведены сформулированные нами основные позитивные и негативные последствия, которые могут проявиться в результате реализации стратегии устойчивого развития в транспортно-дорожной отрасли. Наглядно показано, что следование по пути к УРДС сопряжено с необходимостью постоянного принятия компромиссных решений, как это было сказано выше.



Рис. 2. Позитивные и негативные последствия реализации стратегии устойчивого развития в транспортно-дорожной отрасли

Fig. 2. Positive and negative consequences of sustainable development strategy in road transport service

Заключение

Выбранная для обсуждения тема актуальна ввиду длительного сохранения в России системного кризиса, обусловленного совокупностью напряженной экономической, технической, экологической ситуации в дорожно-транспортной отрасли. Для его преодоления должен быть закреплён наметившийся (благодаря работе Правительства и лично Президента РФ по продвижению нацпроектов) прогресс в установлении баланса между социально-экономической средой и реализацией планов по дорожному строительству.

Требования рыночной экономики к материалам, технологиям строительства и условиям эксплуатации дорог растут. Увеличивается стоимость строительства, ужесточаются экологические нормативы. Для системного решения всего комплекса проблем необходим «переход к интенсивному, инновационному, социально ориентированному типу развития транспортного комплекса». Это отражено в разделе IV Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 № 1734-р⁶), которая «предполагает выполнение научно-исследовательских работ, обеспечивающих разработку новых моделей, методик, технологий, средств и систем, а также их последующее применение».

Использование методологических установок концепции устойчивого развития имеет специфику не только в отношении производственных отраслей, что было показано на примере дорожного строительства. Россия отличается от всех других стран огромными размерами и множеством составляющих ее территорий со значительно различающимися ландшафтно-географическими, климатическими, экологическими, социальными условиями. Эти особенности, в сочетании с высоким уровнем развития человеческого капитала и опорой на идеи русского космизма, на учение В.И. Вернадского о биосфере, на концепцию Н.Н. Моисеева о коэволюции природы и общества, служат фундаментом для разработки новой национальной парадигмы устойчивого развития России. Принятие такой парадигмы на государственном уровне создаст прочный фундамент для деятельности по ее реализации на всех уровнях властных структур, бизнеса и общества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Строительство, эксплуатация и безопасность автомобильной дороги в эколого-социально-экономическом контексте // Проблемы социально-экономического развития Сибири. 2020. № 3. С. 34–39.
2. Jae-Woo Park, Yong Han Ahn. Development of a green road rating system for South Korea // International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. 2015. V. 6. № 4. P. 249–263. DOI: 10.1080/2093761X.2015.1117404
3. Ahn Y.H., Pearce A.R., Ku K. Paradigm shift of green buildings in the construction industry // Int. J. Sustainable Bldg. Technol. Urban Dev. 2011. № 2. P. 52–62.
4. Петросян Т.О., Сидоренко В.Ф. Экологическая безопасность автомобильных дорог // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 28. С. 332–336.

⁶ URL: <http://static.government.ru/media/files/Z31ADuvq0eoXlknPdhwWRY122ISdhpaS.pdf>

5. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Сухина Е.А. Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 438–462.
6. Pimenov D.Y., Mia M., Gupta M.K., Khanna N., et al. Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: a review and future prospects // Renewable And Sustainable Energy Reviews. 2022. V. 166. 112660.
7. Бершадский В.Я. Требования экологической безопасности при проектировании транспортно-дорожных комплексов. Ч. II. Оценка воздействия на окружающую среду и экологическая экспертиза проектов. Екатеринбург : Изд-во Ур-ГУПС, 2013. 257 с.
8. Мартемынов В.А., Любимова Н.С. Нормативно-методическая база и экологическая безопасность автомобильных дорог // Технические науки – от теории к практике. Новосибирск : Изд-во ассоциации научн. сотрудников «Сибирская академическая книга», 2013. № 2. С. 95–98.
9. Миронов А.А., Евгеньев И.Е. Автомобильные дороги и охрана окружающей среды. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1986. 284 с.
10. Лукашевич О.Д., Лукашевич В.Н. Пути повышения экологической безопасности при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 5. С. 200–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-200-210
11. Kehagia F. The implementation of sustainability in highway projects // Int. J. Sus. Dev. Plann. 2009. V. 4. № 1. P. 61–69.
12. Lee J., Edil T., Benson C., Tinjum J. Building environmentally and economically sustainable transportation infrastructure: Green highway rating system // J. Constr. Eng. Manag. 2013. V. 139. P. A4013006.
13. Commission of the European Communities, European Transport Policy for 2010: Time to decide'. White Paper, Brussels, 2001.
14. Kassoff H. Sustainable Highways: Oxymoron or Opportunity. Statement for House Subcommittee on Technology and Innovation, 2007.
15. Лукашевич О.Д., Лукашевич В.Н. Качество, эксплуатационные свойства и экологическая безопасность автомобильной дороги в контексте устойчивого экономического развития // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 5. С. 179–197. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-5-179-197>
16. Жуковский Е.М., Кравченко С.Е., Шехова Н.В. К устойчивому дорожному хозяйству через производство негаресурсов // Наука и техника. 2023. Т. 22. № 3. С. 256–264. URL: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-256-264>
17. Жуковская А.Ю., Гераскин Ю.М. Применение зеленых стандартов в России: проблемы и перспективы // Вестник Евразийской науки. 2019. № 2. URL: <https://esj.today/PDF/37SAVN219.pdf> (дата обращения: 13.11.23).
18. Trocmé M., et. al., COST 341 – Habitat Fragmentation due to Transportation Infrastructure: The European Review. Office for Official Publications of the European Communities, 2003.

REFERENCES

1. Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Road construction, operation and safety in an environmental, social and economic context. *Problemy socialno-ekonomicheskogo razvitiya Sibiri*. 2020; (3): 34–39. (In Russian)
2. Jae-Woo Park, Yong Han Ahn. Development of a green road rating system for South Korea. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2015; 6:4, 249–263, DOI: 10.1080/2093761X.2015.1117404. <http://dx.doi.org/10.1080/2093761X.2015.1117404>.
3. Ahn Y.H., Pearce A.R., Ku K. Paradigm shift of green buildings in the construction industry. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2011; (2): 52–62.
4. Petrosyan T.O., Sidorenko V.F. Environmental safety of motorways. *Vestnik Volgogradskogo gos. arkh.-stroit. un-ta. Ser.: Stroitelstvo i arkhitektura*. 2012; (28): 332–336. (In Russian)

5. Telichenko V.I., Benuzh A. A., Suxinina E.A. Interstate green standards for the formation of environmentally safe living environment. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (4): 438–462. (In Russian)
6. Pimenov D.Y., Mia M., Gupta M.K., Khanna N., et al. Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: a review and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 166: 112660.
7. Bershadskii V.Ya. Environmental safety requirements for transport and road complex design. Part II: Environmental impact assessment and environmental expertise of projects. Ekaterinburg, 2013. 257 p. (In Russian)
8. Martem'yanov V.A., Lyubimova N.S. Regulatory and methodological framework and environmental safety of motorways. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*. 2013; (2): 95–98. (In Russian)
9. Mironov A.A., Evgen'ev I.E. Motorways and environmental protection. Tomsk: TSU, 1986. 284 p. (In Russian)
10. Lukashevich O.D., Lukashevich V.N. Improvement of environmental safety in construction and road service. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (5): 200–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-200-210 (In Russian)
11. Kehagia F. The implementation of sustainability in highway projects. *International Journal of Sustainable Development*. 2009; 4 (1): 61–69.
12. Lee J., Edil T., Benson C., Tinjum J. Building environmentally and economically sustainable transportation infrastructure: Green highway rating system. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2013; 139: A4013006.
13. Commission of the European Communities, European Transport Policy for 2010: Time to decide'. White Paper, Brussels, 2001.
14. Kassoff H. Sustainable highways: Oxymoron or opportunity. Statement for House Subcommittee on Technology and Innovation, 2007.
15. Lukashevich O.D., Lukashevich V.N. Quality, operating properties and environmental safety of automobile road in sustainable economic development. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (5): 179–197. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-5-179-197> (In Russian)
16. Zhukovskij E.M., Kravchenko S.E., Shexova N.V. Sustainable road management through the production of negative resources. *Nauka i tekhnika*. 2023; 22 (3): 256–264. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-256-264> (In Russian)
17. Zhukovskaya A.Yu., Geras'kin Yu.M. Application of green standards in Russia: Problems and prospects. *Vestnik Evrazijskoj nauki*. 2019; (2). Available: <https://esj.today/PDF/37SAVN219.pdf> (accessed November 13, 23). (In Russian)
18. Trocmé M., et. al., COST 341 – Habitat fragmentation due to transportation infrastructure: The European Review, Office for Official Publications of the European Communities, 2003.

Сведения об авторах

Лукашевич Виктор Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vnLuc@yandex.ru

Лукашевич Ольга Дмитриевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, odluk@yandex.ru

Authors Details

Viktor N. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya, 664003, Tomsk, Russia, e-mail: vnLuc@yandex.ru

Olga D. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya, 664003, Tomsk, Russia, e-mail: odluk@yandex.ru

Вклад авторов

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

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 06.12.2023
Одобрена после рецензирования 09.12.2023
Принята к публикации 11.12.2023

Submitted for publication 06.12.2023
Approved after review 09.12.2023
Accepted for publication 11.12.2023

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 233–250.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 233–250.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625 7/8

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250

EDN: VWBDUN

ВЛИЯНИЕ БИТУМНОЙ ЭМУЛЬСИИ НА СВОЙСТВА АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

**Лионель Мавунгу Макая, Любовь Сергеевна Зарапина,
Константин Анатольевич Андрианов, Анатолий Федорович Зубков**
*Тамбовский государственный технический университет,
г. Тамбов, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* При производстве работ по капитальному ремонту дорожных покрытий нежесткого типа и реконструкции автомобильных дорог возникает необходимость разрушения старого покрытия, которое выполняют дорожными фрезами. В процессе холодного фрезирования старого покрытия получают материал в виде гранул, поверхность которых покрыта битумной пленкой. С течением времени битумная пленка теряет свои свойства, и для повторного использования полученного материала необходимо восстановить свойства вяжущего. Введение битумной эмульсии в состав асфальтогранулята позволяет восстановить свойства вяжущего в смеси, что влияет не только на прочностные характеристики асфальтогранулобетонной смеси, но и на деформативную способность и жесткость слоя смеси при действии нагрузки в процессе уплотнения.

Цель. Установить влияние содержания вяжущего на деформативную способность и жесткость слоя из асфальтогранулобетонных смесей.

Материалы и методы. Асфальтогранулят фракций 8/16 и 18/36 мм при содержании остаточного битума 2 %. В качестве вяжущего материала применялась битумная эмульсия ЭБК-2. Для определения предела прочности слоя асфальтогранулобетона изготавливались образцы с разным содержанием битумной эмульсии согласно ГОСТ 12801. Измерение деформации слоя смеси выполнялось с помощью гидравлического пресса ТП-1-1500.

Результаты исследований. Представлены результаты исследования по влиянию содержания битумной эмульсии на деформацию и жесткость слоя асфальтогранулобетонной смеси при устройстве дорожных одежд автомобильных дорог.

Выводы. Установлено, что применение битумной эмульсии при регенерации асфальтогранулята влияет на деформативную способность и жесткость слоя при действии уплотняющей нагрузки. Установлены закономерности развития деформации и жесткости слоя смеси под действием нагрузки при разном содержании вяжущего, размере фракций асфальтогранулята и разной толщине слоя при укладке. Представлены аналитические зависимости для расчета деформации и жесткости слоя от нагрузки, толщины слоя при укладке и процентного содержания битумной эмульсии в смеси.

Ключевые слова: асфальтогранулобетонная смесь, битумная эмульсия, деформация и жесткость слоя

Для цитирования: Макая Л.М., Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние битумной эмульсии на свойства асфальтогранулобетонной смеси при устройстве покрытий нежесткого типа автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 233–250. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250. EDN: VWBDUN

ORIGINAL ARTICLE

BITUMEN EMULSION EFFECT ON PROPERTIES OF ASPHALT-CONCRETE MIX FOR NON-RIGID ROAD PAVEMENTS

**Lionel M. Makaya, Lyubov' S. Zarapina,
Konstantin A. Andrianov, Anatolii F. Zubkov**
Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. During major repairs of non-rigid road surfaces and reconstruction of automobile roads, it is necessary to remove old coating with road cutters. During cold milling of the old coating, the material acquires the form of granules with the surface covered with a bitumen film. Over time, the bitumen film loses its properties, and to reuse the material, it is necessary to restore the binder properties. The introduction of the bitumen emulsion in the composition of asphalt-concrete mix, allows to restore the binder properties affecting not only strength properties of the asphalt-concrete mix, but also deformability and stiffness of the mixture layer under the compressive load.

Purpose: Evaluation of the influence of the binder content on deformability and stiffness of the asphalt-concrete mix.

Methodology: Asphalt granulate fractions are used in proportions 8 to 16 and 18 to 36 mm with a residual bitumen content of 2%. The bitumen emulsion EBK-2 is used as a binder. The ultimate strength of the asphalt layer is measured according to GOST 12801. Deformation of the mixture layer is measured on a TP-1-1500 hydraulic press.

Research findings: The bitumen emulsion effect is shown for deformation and stiffness of the asphalt-concrete mix for the pavement construction.

Value: It is shown that the bitumen emulsion in regeneration of asphalt granulate affects deformability and stiffness of the layer subjected to compaction load. The development of deformation and stiffness of the mixture layer under the load with different binder content, particles size, and layer thickness are established. Analytical dependences are suggested for deformation and stiffness of the loaded layer, its thickness during paving, and percentage of bitumen emulsion in the mixture.

Keywords: asphalt-concrete mix, bitumen emulsion; deformation and stiffness

For citation: Makaya L.M., Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Bitumen emulsion effect on properties of asphalt-concrete mix for non-rigid road pavements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 233–250. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250. EDN: VWBDUN

Введение

При капитальном ремонте и реконструкции автомобильных дорог возникает необходимость разрушения старого асфальтобетонного покрытия, которое выполняют с применением холодных дорожных фрез. В процессе фрезерования асфальтобетонного покрытия получают материал в виде гранул,

поверхность которых покрыта битумной пленкой. Битум на поверхности минеральной частицы покрытия за счет термоокислительных процессов меняет свойства, снижается способность воспринимать внешнюю нагрузку под воздействием транспортных средств и погодных факторов.

Установлено, что содержание битума в материале после холодного фрезерования старого асфальтобетонного покрытия находится в пределах от 2 до 4 %, что позволяет уменьшить расход вяжущего для приготовления асфальтогранулобетонных смесей при одновременном сокращении расходов на минеральные материалы при устройстве дорожных одежд.

Для регенерации асфальтогранулята используют различные вяжущие материалы, в зависимости от которых смеси имеют разные физико-механические характеристики и скорость структурообразования, что позволяет применять их при устройстве дорожных слоев на всех категориях автомобильных дорог. Введение вяжущего в асфальтогранулят влияет на его деформативность, жесткость и прочность [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Анализ работ по применению асфальтогранулобетонных смесей для устройства дорожных одежд автомобильных дорог показал, что битумные эмульсии активно применяются при регенерации асфальтогранулята, позволяют обеспечить более высокие прочностные показатели слоя дорожной одежды. Достижение требуемых характеристик уплотняемого слоя производится с применением механизированного звена машин, выбор параметров которых зависит от конструктивных параметров слоя и свойств уплотняемого материала, зависящих от содержания битумной эмульсии в смеси. Представленные авторами результаты исследований применения битумных эмульсий при регенерации асфальтогранулята характеризуют свойства смеси при конкретном содержании битумной эмульсии в смеси без обобщения влияния ее содержания на деформативные свойства и жесткость слоя смеси при действии уплотняющей нагрузки [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

В работе представлены результаты исследований по влиянию содержания битумной эмульсии в смеси асфальтогранулобетона на деформацию и жесткость слоя при действии нагрузки и конструктивных параметров уплотняемого слоя смеси.

Методика проведения исследования

Эффективность процесса уплотнения зависит от действующей нагрузки и свойств слоя уплотняемого материала и характеризуется величиной необратимой деформации. Введение битумной эмульсии при приготовлении асфальтогранулобетонной смеси влияет на деформативные свойства и жесткость уплотняемого слоя.

За исходный материал принят асфальтогранулят фракций 8/16 и 18/36 мм при содержании остаточного битума 2 %. В качестве вяжущего материала применялась битумная эмульсия ЭБК-2. В процессе приготовления смеси асфальтогранулят нагревали до температуры 90–100 °С. По окончании нагрева в асфальтогранулят добавлялась битумная эмульсия с последующим перемешиванием.

Для определения предела прочности асфальтогранулобетона изготавливались образцы испытываемой смеси с разным содержанием битумной эмульсии

согласно ГОСТ 12801. Прочность образцов в зависимости от времени испытания составляла от 2,8 до 3,0 МПа. Измерение деформации слоя смеси выполнялось на установке, позволяющей измерять деформацию слоя (полную, остаточную и упругую) индикатором часового типа с точностью до 0,01 мм при контролируемой нагрузке с использованием гидравлического пресса ТП-1-1500. Толщина слоя принималась 0,05; 0,10 и 0,15 м.

Исследовательская часть

Эффективность воздействия уплотняющей нагрузки на слой материала характеризуется величиной необратимой деформации, которая зависит от нагрузки в зоне контакта рабочего органа машины с поверхностью слоя, конструктивных параметров слоя и свойств уплотняемого материала.

Под действием нагрузки в слое возникают деформации, влияющие на изменение характеристик материала (плотность, жесткость, вязкость, пористость). Для уточнения влияния битумной эмульсии при регенерации асфальтогранулята на деформацию слоя при разной толщине и размере гранул смеси проведены исследования.

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты измерения деформаций (полная, остаточная и упругая) при действии переменной нагрузки на слой асфальтогранулобетонной смеси фракции 8/16 мм с содержанием битумной эмульсии 4 %.

Таблица 1

Деформация слоя асфальтогранулобетонной смеси фракции 8/16 мм с содержанием битумной эмульсии 4 %

Table 1

Strain parameters of asphalt-concrete mix layer with 8/16 mm fraction and 4% of bitumen emulsion

Напряжение, МПа	Толщина 0,05 м			Толщина 0,1 м			Толщина 0,15 м		
	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{ост}}$
0,5	1,78	0,24	1,54	1,45	0,76	0,69	2,09	1,42	0,67
1,0	2,45	1,34	1,11	2,84	0,6	2,24	2,81	1,71	1,10
2,0	3,00	1,2	1,80	3,37	1,53	1,84	4,40	0,62	3,78
3,0	2,66	1,81	0,85	3,39	1,80	1,59	5,54	1,85	3,69
4,0	2,84	1,4	1,44	3,40	1,64	1,76	2,9	1,05	1,85
5,0	3,37	1,23	2,14	3,60	2,04	1,56	3,05	1,80	1,25
6,0	2,8	1,12	1,68	2,97	1,17	1,80	3,99	2,28	1,71
7,0	3,05	1,65	1,4	3,25	1,61	1,64	3,56	1,96	1,60

По результатам измерения деформаций слоя смеси установлены зависимости величины остаточной деформации от действующей нагрузки при разных размерах асфальтогранулята в смеси, толщины слоя и содержания вяжущего. Полученные результаты представлены на рис. 1.

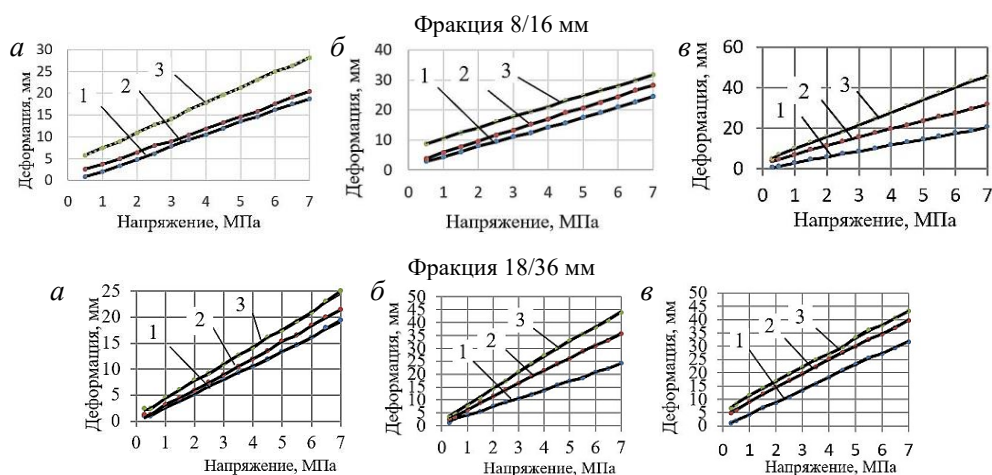


Рис. 1. Зависимость деформации слоя от напряжения при разном содержании эмульсии в смеси:

a – толщина слоя 0,05 м; *б* – 0,10 м; *в* – 0,15 м; 1 – содержание эмульсии 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Fig. 1. Stress-strain curves of different layer thickness and emulsion content:

a – 0.05 m; *b* – 0.10 m; *c* – 0.15 m; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Из представленных на рис. 1 результатов видно, что независимо от содержания вяжущего в смеси, толщины слоя при укладке и размера фракции асфальтогранулобетонной смеси между напряжением и деформацией слоя существует линейная зависимость. Численное значение остаточной деформации слоя от нагрузки при разном содержании эмульсии и толщине слоя с учетом размера фракции определяется по формулам, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Зависимости остаточной деформации слоя
асфальтогранулобетонной смеси от напряжения

Table 2

Stress-strain dependence of mix layer

Содержание эмульсии, %	Толщина слоя, м	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
2	0,05	$2,81\sigma - 0,72$	$2,76\sigma - 0,30$
	0,10	$3,30\sigma + 1,15$	$3,33\sigma + 0,66$
	0,15	$2,96\sigma + 0,14$	$4,63\sigma - 0,38$
4	0,05	$2,76\sigma + 0,90$	$3,0\sigma - 0,15$
	0,10	$3,74\sigma + 2,05$	$4,96\sigma + 1,43$
	0,15	$4,13\sigma + 2,95$	$5,17\sigma + 3,91$
6	0,05	$3,47\sigma + 3,92$	$3,35\sigma + 0,97$
	0,10	$3,52\sigma + 7,09$	$6,04\sigma + 2,26$
	0,15	$6,06\sigma + 3,66$	$5,39\sigma + 5,76$

Примечание. σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений находится в пределах 0,98–0,99.

Для установления общей зависимости деформации при заданной толщине слоя от напряжения с учетом содержания эмульсии представим данные на рис. 1 в относительных значениях, принимая деформацию каждого слоя при напряжении 1,0 МПа за единицу. Обозначим принятую величину коэффициентом влияния напряжения на деформацию слоя ($K_{\sigma\epsilon}$).

Зависимость коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ от напряжения для фракции 8/16 мм с учетом толщины слоя представлена на рис. 2.

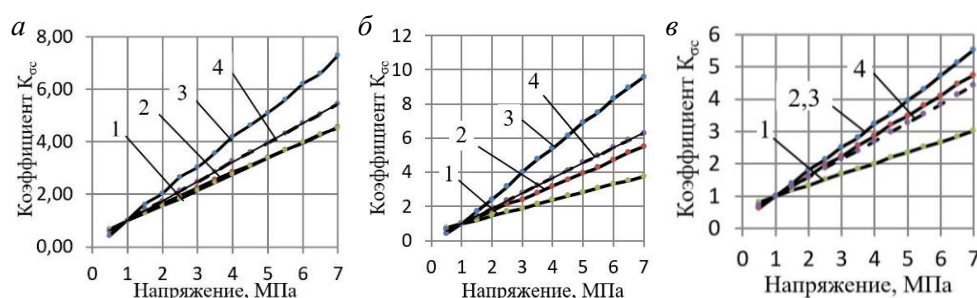


Рис. 2. Зависимость коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ от напряжения для фракции 8/16 мм:
а – 0,05 м; б – 0,10 м; в – 0,15 м; 1 – 2 % эмульсии; 2 – 4 %; 3 – 6 %; 4 – общая зависимость

Fig. 2. Stress-strain curves for 8/16 mm fraction at different layer thickness and emulsion content:
а – 0.05 m; б – 0.10 m; в – 0.15 m; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %, 4 – general

Аналогичные зависимости установлены для фракции 18/36 мм. Численное значение коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ при заданной толщине слоя и разном содержании битумной эмульсии в смеси представлено в табл. 3.

Таблица 3

Зависимости для расчета коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$

Table 3

Calculation parameters for coefficient $K_{\sigma\epsilon}$

Толщина слоя, м	Содержание эмульсии, %	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
0,05	2	$1,44\sigma - 0,37$	$1,1\sigma - 0,167$
	4	$0,60\sigma + 0,38$	$0,982\sigma - 0,09$
	6	$1,03\sigma - 0,03$	$0,768\sigma + 0,19$
0,10	2	$0,75\sigma + 0,24$	$0,795\sigma + 0,187$
	4	$2,79\sigma + 1,52$	$0,796\sigma + 0,249$
	6	$0,60\sigma + 0,38$	$0,741\sigma + 0,297$
0,15	2	$0,47\sigma + 0,53$	$1,134\sigma - 0,094$
	4	$0,33\sigma + 0,67$	$0,567\sigma + 0,451$
	6	$0,60\sigma + 0,38$	$0,467\sigma + 0,525$

Примечание. σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Из представленных в табл. 3 зависимостей видно, что независимо от содержания битумной эмульсии в смеси развитие деформации слоя характеризуется линейной зависимостью, и в зависимости от толщины слоя значение коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$ определяется по формулам, представленным в табл. 4.

Таблица 4

Зависимости для расчета коэффициента $K_{\sigma\epsilon}$

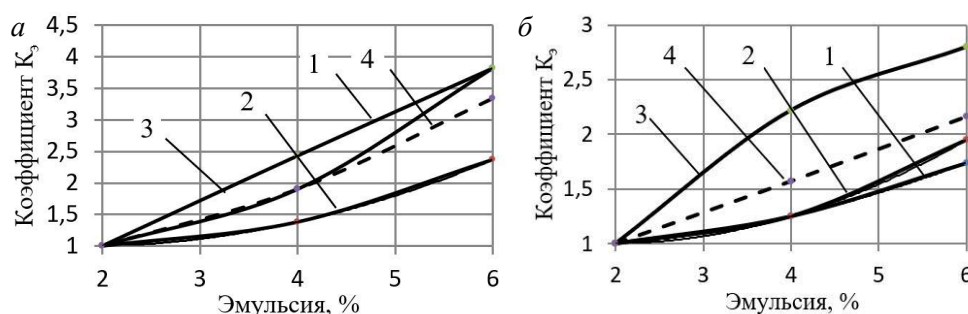
Table 4

Calculation parameters for coefficient $K_{\sigma\epsilon}$

Толщина слоя, м	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
0,05	$0,88\sigma + 0,13$	$0,95\sigma - 0,02$
0,10	$0,57\sigma + 0,43$	$0,78\sigma + 0,24$
0,15	$0,74\sigma + 0,27$	$0,72\sigma + 0,29$

Примечание. σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Из представленных на рис. 2 данных видно, что необратимая деформация независимо от толщины слоя зависит от содержания битумной эмульсии в смеси. Для уточнения влияния содержания эмульсии в смеси принимаем деформацию слоя при напряжении 1,0 МПа и содержании эмульсии 2 % каждого слоя за единицу. Обозначим данную величину через коэффициент влияния эмульсии на величину деформации слоя ($K_{жэ}$). Влияние содержания эмульсии на величину коэффициента $K_{жэ}$ для разных фракций смеси представлено на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость коэффициента $K_{жэ}$ от толщины слоя:

a – фракция 8/16 мм; *b* – фракция 18/36 мм; 1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – общая зависимость

Fig. 3. Dependence between stiffness coefficient and layer thickness:

a – 8/16 mm fraction; *b* – 18/36 mm fraction; 1 – 0.05 m; 2 – 0.10 m; 3 – 0.15 m; 4 – general dependence

Из представленных данных на рис. 3 видно, что содержание эмульсии в смеси влияет на величину коэффициента $K_{жэ}$, он возрастает с увеличением ее в смеси. Численное значение коэффициента $K_{жэ}$ определяется по формулам, представленным в табл. 5.

Таблица 5

Зависимости для расчета коэффициента $K_{жэ}$

Table 4

Calculation parameters for coefficient $K_{жэ}$

Толщина слоя, м	Фракция 8/16 мм	Фракция 18/36 мм
0,05	$0,127Э^2 - 0,315Э + 1,12$	$0,03Э^2 - 0,055Э + 0,99$
0,10	$0,0762Э^2 - 0,267Э + 1,23$	$0,056Э^2 - 0,213Э + 1,2$
0,15	$-0,005Э^2 + 0,75Э - 0,47$	$-0,08Э^2 + 1,09Э - 0,86$
Общая	$0,55e^{0,33Э\%}$	$0,69e^{0,193Э\%}$

Примечание. Э – процентное содержание эмульсии в смеси. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,98–0,99.

С учетом установленных значений коэффициентов $K_{сс}$ и $K_{жэ}$ величина остаточной деформации для каждого слоя асфальтогранулобетонной смеси при действии нагрузки определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$\lambda_{0,05} = 1,95K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,10} = 4,44K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,15} = 2,85K_{сс}K_{жэ}; \quad (1)$$

– фракция 18/36 мм:

$$\lambda_{0,05} = 2,53K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,10} = 4,16K_{сс}K_{жэ}; \quad \lambda_{0,15} = 4,08K_{сс}K_{жэ}. \quad (2)$$

Из представленных на рис. 3 результатов видно, что в зависимости от толщины слоя и размера фракций асфальтогранулята в смеси содержание битумной эмульсии в составе смеси по-разному влияет на деформацию слоя.

С целью уточнения влияния толщины слоя на его деформацию принимаем: толщину слоя 0,05 м и содержание вяжущего в смеси 2 % – за единицу, независимо от размера фракции. Обозначим принятую величину через коэффициент влияния толщины на деформацию слоя (K_h). Численное значение коэффициента определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_h = -114h^2 + 24,7h + 0,05; \quad (3)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_h = -134h^2 + 32,9h - 0,31, \quad (4)$$

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Анализ установленных закономерностей влияния напряжения и содержания битумной эмульсии в асфальтогранулобетонной смеси на деформацию слоя показал, что имеются общие закономерности отмеченных факторов на развитие деформации.

По результатам экспериментальных исследований установлены общие зависимости влияния напряжения и содержания битумной эмульсии в пределах от 2 до 6 % в зависимости от размера фракций асфальтогранулята в смеси, которые имеют вид:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{сф} = 0,73\sigma + 0,27; \quad K_{эф} = 0,55e^{0,33Э\%}; \quad (5)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{\sigma\phi} = 0,71\sigma + 0,29; \quad K_{\varepsilon\phi} = 0,69e^{0,193\varepsilon\%}, \quad (6)$$

где σ – напряжение в зоне контакта с поверхностью слоя, МПа; $\varepsilon\%$ – процентное содержание эмульсии в смеси. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

В конечном виде зависимости для определения остаточной деформации асфальтогранулобетонной смеси при действии напряжения, содержания битумной эмульсии в смеси и толщины слоя при укладке определяются по формулам:

– для фракции 8/16 мм:

$$\lambda = 1,07K_{\sigma}K_{\varepsilon}e^{0,33\varepsilon\%}; \quad (7)$$

– для фракции 18/36 мм:

$$\lambda = 1,75K_{\sigma}K_{\varepsilon}e^{0,193\varepsilon\%}. \quad (8)$$

С целью уточнения влияния битумной эмульсии в процессе регенерации асфальтогранулята на остаточную деформацию слоя смеси использованы результаты измерения деформации асфальтогранулята без добавления эмульсии.

Принимая деформацию слоя асфальтогранулята без эмульсии за единицу, устанавливаем общее влияние эмульсии на деформацию слоя, которая представлена на рис. 4.

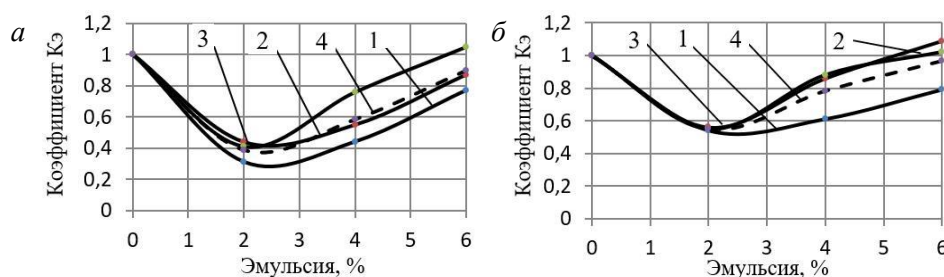


Рис. 4. Влияние содержания эмульсии на деформацию слоя асфальтогранулобетонной смеси:

a – фракция 8/16 мм; *б* – 18/36 мм; 1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – общая зависимость

Fig. 4. Influence of emulsion content on deformation of asphalt-concrete mix layer:

a – 8/16 mm; *b* – 18/36 mm; 1 – 0.05 m; 2 – 0.10 m; 3 – 0.15 m; 4 – total dependence

Из представленных результатов исследования видно, что введение в состав асфальтогранулята битумной эмульсии в процессе приготовления асфальтогранулобетонной смеси влияет на деформативную способность смеси независимо от толщины слоя и размера фракций. При добавлении эмульсии до 2 % в состав асфальтогранулята происходит снижение деформативной способности уплотняемого слоя, что можно объяснить увеличением сил сцепления при образовании контактов между частицами смеси. С повышением содержания эмульсии в смеси сопротивление действующей нагрузке снижается за счет увеличения толщины битумной пленки на поверхности частиц, которая выполняет роль смазки при образовании контактов частиц асфальтогранулята при формировании структуры слоя.

Выбор параметров уплотняющих машин зависит от жесткости слоя материала. Изменение деформативной способности слоя асфальтогранулобетонной смеси при введении битумной эмульсии приводит к изменению жесткости слоя.

Анализ параметров катков показал, что каждый каток соответствует определенной области эффективного применения в соответствии со своими силовыми характеристиками. За величину, характеризующую необходимую нагрузку для обеспечения единичной деформации слоя, принят коэффициент жесткости ($K_{ж}$).

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента жесткости смеси фракций 8/16 и 18/36 мм от напряжения при разном содержании битумной эмульсии в слое толщиной 0,10 м.

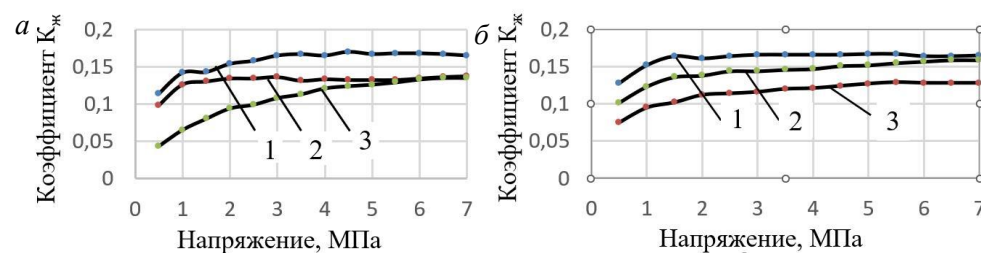


Рис. 5. Зависимость коэффициента жесткости смеси от напряжения при разном содержании битумной эмульсии в смеси:

Fig. 5. Dependence of mixture stiffness coefficient on stress at different content of bitumen emulsion:

a – 8/16 mm; б – 18/36 mm; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Из представленных на рис. 5 данных видно, что жесткость слоя зависит от содержания эмульсии в смеси, размера фракции и действующего напряжения на слой материала. С повышением содержания битумной эмульсии в смеси значение коэффициента $K_{ж}$ понижается независимо от размера фракции смеси, что объясняется повышением толщины битумной пленки в зоне контакта частиц смеси.

На начальном этапе действия нагрузки жесткость слоя повышается за счет роста плотности слоя материала (уменьшения пористости), и при достижении определенной величины нагрузки жесткость слоя стабилизируется. В зависимости от толщины слоя и размера фракции смеси стабилизация жесткости слоя различна. Если при толщине слоя 0,05 мм фракции 8/16 мм коэффициент стабилизируется при достижении напряжения 3,0 МПа, то для фракции 18/36 мм это происходит при напряжении 1,5 МПа. С повышением толщины слоя коэффициент жесткости существенно зависит от размера фракций асфальтогранулята в смеси. При устройстве слоя толщиной 0,10 и 0,15 м фракции 8/16 мм стабилизация коэффициента жесткости наблюдается при напряжении соответственно 1,0 и 5,0 МПа, а для фракции 18/36 мм стабилизация жесткости происходит при напряжении 2,0 МПа. С увеличением содержания битумной эмульсии, за счет повышения битумной пленки на поверхности частиц асфальтогранулята, жесткость слоя понижается. Аналогичные за-

кономерности влияния битумной эмульсии на жесткость слоя наблюдаются при укладке смеси толщиной 0,05 и 0,15 м.

Для уточнения влияния напряжения на жесткость слоя толщиной 0,10 м при разном содержании битумной эмульсии представим данные на рис. 5 в относительных значениях, принимая значения коэффициента жесткости каждого слоя при напряжении 1,0 МПа за единицу. Обозначим принятую величину коэффициентом влияния напряжения на коэффициент жесткости слоя ($K_{ж\sigma}$).

Зависимости коэффициента жесткости слоя от напряжения для слоев фракции 8/16 мм и 18/36 мм с учетом содержания битумной эмульсии в смеси представлены на рис. 6.

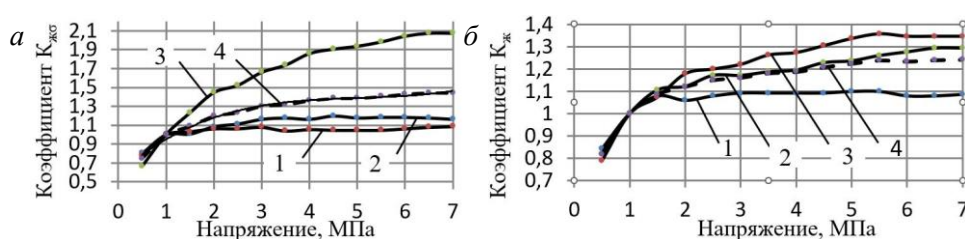


Рис. 6. Зависимости коэффициента $K_{ж\sigma}$ слоя от напряжения и содержания эмульсии в смеси:
а – фракция 8/16 мм; б – 18/36 мм; 1 – 2 % битумной эмульсии; 2 – 4 %; 3 – 6 %; 4 – общая зависимость

Fig. 6. Dependence of layer stiffness coefficient on stress at different content of bitumen emulsion in the mixture:
а – 8/16 mm; б – 18/36 mm; 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %

Из представленных данных на рис. 6 видно, что имеется общая закономерность влияния напряжения на коэффициент жесткости слоя, что позволяет уточнить влияние эмульсии на коэффициент жесткости при разном ее содержании с учетом толщины слоя.

Численное значение коэффициента $K_{ж\sigma}$ для слоев толщиной 0,10 м определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{ж\sigma} = 0,0055\sigma^3 - 0,083\sigma^2 + 0,44\sigma + 0,588; \quad (9)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{ж\sigma} = 0,0043\sigma^3 - 0,062\sigma^2 + 0,3\sigma + 0,723, \quad (10)$$

где σ – действующее напряжение, МПа; $K_{ж\sigma}$ – коэффициент жесткости, безразмерная величина. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,96–0,98.

Установлено, что содержание битумной эмульсии в смеси влияет на жесткость слоя независимо от размера фракций асфальтогранулобетонной смеси. При укладке слоя фракции 8/16 мм в зависимости от изменения содержания эмульсии коэффициент $K_{ж\sigma}$ находится в интервале от 1,1 до 2,1, а для фракции 18/36 мм коэффициент изменяется в пределах от 1,1 до 1,35.

Для установления влияния битумной эмульсии в смеси на коэффициент жесткости слоя для разных фракций при толщине слоя 0,10 м представим данные на рис. 6 в относительных значениях. Принимаем коэффициент жест-

кости каждого слоя фракции при разном содержании эмульсии за единицу и обозначим данную величину коэффициентом влияния эмульсии в смеси ($K_{жэ}$). Численное значение данного коэффициента определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{жэ} = -0,0395\mathcal{E}^2 + 0,181\mathcal{E} + 0,797; \quad (11)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{жэ} = 0,0699\mathcal{E}^2 - 0,607\mathcal{E} + 1,934, \quad (12)$$

где \mathcal{E} – содержание битумной эмульсии в смеси, %. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

С учетом полученных значений коэффициентов $K_{жс}$ и $K_{жэ}$ зависимости для расчета коэффициента жесткости слоя толщиной 0,10 м определяются по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{ж} = 0,142K_{жс}K_{жэ}, \text{ МПа/мм}, \quad (13)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{ж} = 0,152K_{жс}K_{жэ}, \text{ МПа/мм}. \quad (14)$$

Влияние битумной эмульсии на коэффициент жесткости слоя асфальтогранулобетонной смеси при толщине слоя 0,05 и 0,15 м и содержании битумной эмульсии от 2 до 6 % представлено на рис. 7.

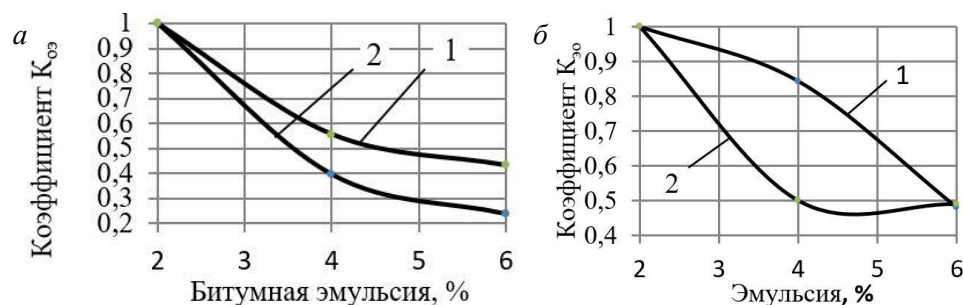


Рис. 7. Зависимость коэффициента $K_{ж}$ для слоев толщиной 0,05 и 0,10 м при разном содержании битумной эмульсии в смеси

Fig. 7. Dependences of stiffness coefficient for 0.05 and 0.10 m layers at different content of bitumen emulsion

Из представленных данных на рис. 7 видно, что с повышением содержания битумной эмульсии в составе асфальтогранулобетонной смеси происходит снижение величины коэффициента жесткости слоя.

Численные значения коэффициентов $K_{жс}$ и $K_{жэ}$ для слоев толщиной 0,05 и 0,15 м представлены в табл. 6.

С учетом установленных зависимостей для определения коэффициентов $K_{жс}$ и $K_{жэ}$ при укладке слоев толщиной 0,05 и 0,15 м общий коэффициент жесткости слоя определяется по формулам, МПа/мм:

– толщина слоя 0,05 м:

$$\text{фракция 8/16 мм: } K_{ж} = 0,391K_{жс}K_{жэ}; \text{ фракция 18/36 мм: } K_{ж} = 0,225K_{жс}K_{жэ}; \quad (15)$$

– толщина слоя 0,15 м:

$$\text{фракция } 8/16 \text{ мм: } K_{\text{ж}} = 0,169K_{\text{ж}\sigma}K_{\text{ж}\varepsilon}, \text{ фракция } 18/36 \text{ мм: } K_{\text{ж}} = 0,114K_{\text{ж}\sigma}K_{\text{ж}\varepsilon}. \quad (16)$$

Таблица 6

Значение коэффициентов $K_{\text{ж}\sigma}$ и $K_{\text{ж}\varepsilon}$ для расчета деформации слоя асфальтогранулобетонной смеси

Table 6

Stiffness coefficients for layer deformation analysis

Фракция, мм	Толщина слоя, м	$K_{\text{ж}\sigma}$	$K_{\text{ж}\varepsilon}$
8/16	0,05	$0,004\sigma^3 - 0,058\sigma^2 + 0,257\sigma + 0,76$	$0,055\varepsilon^2 - 0,636\varepsilon + 2,05$
	0,15	$0,001\sigma^3 - 0,024\sigma^2 + 0,13\sigma + 0,883$	$0,04\varepsilon^2 - 0,462\varepsilon + 1,764$
18/36	0,05	$0,001\sigma^3 - 0,02\sigma^2 + 0,094\sigma + 0,922$	$-0,025\varepsilon^2 + 0,076\varepsilon + 0,95$
	0,15	$0,00\sigma^3 - 0,105\sigma^2 + 0,539\sigma + 0,521$	$0,061\varepsilon^2 - 0,617\varepsilon + 1,99$

Установлено, что имеются общие закономерности влияния битумной эмульсии и действующего напряжения на коэффициент жесткости слоя независимо от толщины, что позволяет установить общую зависимость для расчета коэффициента жесткости. Общая зависимость влияния напряжения на коэффициент жесткости смеси определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{\text{ж}} = 0,004\sigma^3 - 0,0557\sigma^2 + 0,276\sigma + 0,745; \quad (17)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{\text{ж}} = 0,004\sigma^3 - 0,063\sigma^2 + 0,312\sigma + 0,722, \quad (18)$$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Толщина слоя влияет на необратимую деформацию при действии нагрузки, а следовательно, и на коэффициент жесткости слоя. С учетом принятия коэффициента жесткости слоя при толщине слоя 0,05 м за единицу при действии нагрузки 1,0 МПа и содержании битумной эмульсии в смеси 2 % установлено влияние толщины слоя на коэффициент жесткости асфальтогранулобетонной смеси.

Численное значение коэффициента K_h для разного состава смеси определяется по формулам:

– для фракции 8/16 мм:

$$K_h = 31,6h^2 - 11,22h + 1,48; \quad (19)$$

– для фракции 18/36 мм:

$$K_h = 112h^2 - 28,8h + 2,16, \quad (20)$$

где h – толщина слоя при укладке, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Введение в состав смеси битумной эмульсии влияет на коэффициент жесткости слоя. Для установления влияния содержания битумной эмульсии проведено сравнение коэффициента жесткости слоя с жесткостью слоя ас-

фальтогранулята без добавления эмульсии. С учетом принятия коэффициента жесткости слоя без добавления эмульсии за единицу на рис. 8 представлено влияние битумной эмульсии на коэффициент жесткости слоя смеси при разном процентном содержании битумной эмульсии.

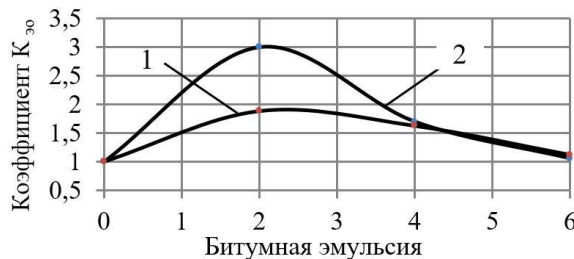


Рис. 8. Влияние содержания битумной эмульсии на величину коэффициента K_{30} :

1 – фракция 8/16 мм; 2 – фракция 18/36 мм

Fig. 8. Influence of bitumen emulsion content on coefficient K_{30} :

1 – 8/16 mm; 2 – 18/36 mm

Из представленных данных на рис. 8 видно, что при добавлении эмульсии до 2 % в состав смеси коэффициент K_{30} возрастает. Это объясняется тем, что при незначительном введении битумной эмульсии в состав смеси на поверхности частиц асфальтогранулята образуется битумная пленка, за счет которой возрастает сцепление между частицами смеси, что приводит к повышению жесткости слоя под действием нагрузки. С увеличением содержания битумной эмульсии в смеси толщина пленки на поверхности частиц асфальтогранулята возрастает, что приводит к снижению сил сцепления между частицами и понижению жесткости слоя.

Численное значение коэффициента жесткости слоя асфальтогранулобетонной смеси при разном содержании эмульсии в смеси определяется по формулам:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{30} = 0,082\mathcal{E}^3 - 0,907\mathcal{E}^2 + 2,485\mathcal{E} + 1; \quad (21)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{30} = 0,0182\mathcal{E}^3 - 0,256\mathcal{E}^2 + 0,882\mathcal{E} + 1, \quad (22)$$

где \mathcal{E} – процентное содержание битумной эмульсии в смеси. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98–0,99.

Общий коэффициент жесткости уплотняемого слоя асфальтогранулобетонной смеси с учетом размера фракции гранулята определяется по формулам, МПа/мм:

– фракция 8/16 мм:

$$K_{ж} = 0,391K_{ж\sigma}K_{ж\mathcal{E}}K_{л}; \quad (23)$$

– фракция 18/36 мм:

$$K_{ж} = 0,225K_{ж\sigma}K_{ж\mathcal{E}}K_{л}. \quad (24)$$

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– Введение в состав асфальтогранулята битумной эмульсии в процессе приготовления асфальтогранулобетонной смеси влияет на деформативную способность смеси независимо от толщины слоя и размера фракций смеси. При добавлении эмульсии в состав смеси до 2 % происходит снижение деформативной способности слоя, что можно объяснить увеличением сил сцепления при образовании контактов между частицами смеси. С повышением содержания эмульсии в смеси сопротивление действующей нагрузке снижается за счет увеличения толщины битумной пленки на поверхности частиц, которая выполняет роль смазки при контактировании частиц асфальтогранулята под действием нагрузки при формировании структуры слоя.

– Содержание битумной эмульсии в смеси при действии нагрузки влияет на жесткость слоя независимо от размера фракций асфальтогранулобетонной смеси. Жесткость слоя смеси зависит от ее фракционного состава. Содержание битумной эмульсии в составе смеси до 2 % приводит к повышению жесткости уплотняемого слоя. При устройстве слоя фракции 8/16 мм коэффициент $K_{жс}$ возрастает в 2 раза, а при устройстве слоя фракции 18/36 мм – в три раза. При дальнейшем повышении содержания битумной эмульсии в составе асфальтогранулобетонной смеси происходит снижение коэффициента жесткости слоя.

– При выборе параметров уплотняющих машин для обеспечения качества работ при устройстве дорожных одежд необходимо учитывать содержание битумной эмульсии в составе асфальтогранулобетонной смеси.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд : труды Союздорнии. Москва, 1980. С. 64–71.
2. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. 1989. № 5. С. 12–13.
3. Пермяков В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. 2005. № 10. С. 8–9.
4. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог / под ред. С.Г. Цупикова. Москва : Инфра-Инженерия, 2009. 924 с.
5. Калгин Ю.И., Строкін А.С., Тюков Е.Б. Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий с применением модифицированных битумов. Воронеж : Воронежская областная типография, 2014. 223 с.
6. Руденский А.В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ // Новости в дорожном деле : науч.-техн. информ. сб. Москва : Информавтодор, 2006. Вып. 1. С. 11–42.
7. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. универ-та, 2006. 272 с.
8. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Антонов А.И., Однолько В.Г. Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2017. 316 с.
9. Сенибабнов С.А., Архелов И.С., Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Макаров А.М. Расчет напряжений в зоне контакта вальца с уплотняемым материалом. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611722.
10. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Макаров А.М., Пилецкий М.Э. Расчет деформаций материала при действии динамической нагрузки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663676.

11. Pakhomova E.G., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Monastyrev P.V. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement // *Journal of Applied Engineering Science*. 2020. V. 18. № 2. P. 192–197.
12. Макая Л.М., Зубков А.Ф., Андрианов К.А. Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума*. Тамбов, 2023. С. 316–318.
13. Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние свойств материала, получаемого при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа, на деформацию слоя при устройстве дорожной одежды // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. № 1 (65). С. 85–95.
14. Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф., Кузнецов А.А. Определение реологических характеристик асфальтогранулята при устройстве слоев дорожной одежды // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. 2021. № 1 (12). С. 37–42.
15. Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние толщины слоя асфальтогранулята на выбор параметров катков при укреплении обочин автомобильных дорог // *Приволжский научный журнал*. 2020. № 4 (56). С. 163–173.
16. Зарапина Л.С., Макая Л.М., Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Эффективность применения асфальтогранулята при ремонте и реконструкции автомобильных дорог // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Е.М. Чернышова*. Тамбов, 2022. С. 346–349.
17. Зубков А.Ф. Обоснование параметров контакта металлического вальца катка с уплотняемым материалом // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Дорожно-транспортное строительство*. 2004. № 3. С. 77.
18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020. № 1 (45). P. 42–54.
19. Зубков А.Ф., Зарапина Л.С., Андрианов К.А. Влияние нагрузки на модуль упругости слоя из асфальтогранулята при восстановлении покрытия дорожной одежды // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. № 1 (65). С. 96–105.
20. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Сенибабнов С.А. Моделирование процессов уплотнения асфальтогранулята с использованием экспериментальных данных // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума*. Тамбов, 2023. С. 293–295.

REFERENCES

1. Harhuta N.Ya. Theory of road pavement compaction. In: *Compaction of earth bed and road covers*. Trudy Soyuzdornii. Moscow, 1980. Pp. 64–71. (In Russian)
2. Permyakov V.B., Zaharenko A.V. Justification of contact pressures for compaction of asphalt concrete mixtures. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1989; (5): 12–13. (In Russian)
3. Permyakov V.B. Compaction efficiency of asphalt concrete mixtures in pavements. *Stroitel'nye materialy*. 2005; (10): 8–9. (In Russian)
4. Tsupikov S.G. (Ed.) Road Master's Handbook. Construction, operation and repair of motorways. Moscow: Infra-Inzhenenriya, 2009. 924 p. (In Russian)
5. Kalgin Yu.I., Strokin A.S., Tyukov E.B. Prospective technologies of construction and repair of road pavements using modified bitumen. Voronezh, 2014. 223 p. (In Russian)
6. Rudenskij A.V. Cold asphalt concrete. Possibilities to extend the season of construction and repair works. *Novosti v dorozhnom dele*. 2006; (1): 11–42. (In Russian)
7. Kalgin Yu.I. Road bituminous-mineral materials based on modified bitumen. Voronezh, 2006. 272 p. (In Russian)
8. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Antonov A.I., Odnol'ko V.G. Construction and repair of non-rigid road pavements taking into account temperature regimes of asphalt concrete mix. Tambov, 2017. 316 p. (In Russian)

9. Senibabnov S.A., Arhelov I.S., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M. "Calculation of stresses in the roller and material contact zone", RF Certificate of State Registration of Software N 2020611722. (In Russian)
10. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M., Pileckij M.E. "Calculation of material deformation under dynamic loads", RF Certificate of State Registration of Software. N 2017663676. (In Russian)
11. Pakhomova E.G., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Monastirev P.V. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement. *Journal of Applied Engineering Science*. 2020; 18 (2): 192–197. (In Russian)
12. Makaya L.M., Zubkov A.F., Andrianov K.A. Development of a mathematical model of pavement layer compaction processes. In: *Proc. 8th Int. Symp. 'Relevant Problems of Computer Simulation of Structures'*, Tambov, 2023. Pp. 316–318. (In Russian)
13. Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of material properties obtained by cold milling of non-rigid pavements on layer deformation during pavement construction. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. 2022; 1 (65): 85–95. (In Russian)
14. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Kuznecov A.A. Determination of rheological characteristics of asphalt granulate for pavements. *Vestnik PGUAS: Stroitel'stvo, nauka i obrazovanie*. 2021; 1 (12): 37–42. (In Russian)
15. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of asphalt granulate layer thickness on choice of roller parameters at reinforcement of motorway shoulders. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal*. 2020; 4 (56): 163–173. (In Russian)
16. Zarapina L.S., Makaya L.M., Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Efficiency of asphalt granulate application in road repair and reconstruction. In: *Proc. 9th Sci. Conf. 'Stable Development of the Region: Architecture, Construction, Transport'*, 2022. Pp. 346–349. (In Russian)
17. Zubkov A.F. Parameter justification of contact between metal roller and compacted material. *Dorozhno-transportnoe stroitel'stvo*. 2004; (3): 77. (In Russian)
18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020; 1 (45): 42–54.
19. Zubkov A.F., Zarapina L.S., Andrianov K.A. Loading effect on elastic modulus of asphalt granular layer during pavement repair. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. 2022; 1 (65): 96–105. (In Russian)
20. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Senibabnov S.A. Modeling of asphalt granulate compaction processes using experimental data. In: *Proc. 8th Int. Symp. 'Relevant Problems of Computer Modeling of Structures'*. 2023. Pp. 293–295. (In Russian)

Сведения об авторах

Макая Лионель Мавунгу, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, lionelmavungu@mail.ru

Зарапина Любовь Сергеевна, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, lyubov.guseva.2012@bk.ru

Андрянов Константин Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, konst-68@yandex.ru

Зубков Анатолий Федорович, докт. техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, корп. Е, afzubkov2013@yandex.ru

Authors Details

Lionel M. Makaya, Research Assistant, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, lionelmavungu@mail.ru

Lyubov' S. Zarapina, Research Assistant, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, lyubov.guseva.2012@bk.ru

Konstantin A. Andrianov, PhD, A/Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, konst-68@yandex.ru

Anatolii F. Zubkov, DSc, Professor, Tambov State Technical University, 112, Michurinskaya Str., 392032, Tambov, Russia, afzubkov2013@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 28.09.2023
Одобрена после рецензирования 18.10.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 28.09.2023
Approved after review 18.10.2023
Accepted for publication 09.11.2023