

[illegible]

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. кафедрой строительной механики ТГАСУ; гл. редактор; lls@tsuab.ru; г. Томск
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, главный научный секретарь РААСН; pavel.akimov@gmail.com; г. Москва
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО; amb@stadyo.ru; г. Москва
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России; niitag@yandex.ru; г. Москва
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, ректор ТГАСУ; rector@tsuab.ru; г. Томск
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ; vvgg-tomsk@mail.ru; г. Томск
Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой технологии строительного производства ТГАСУ; tsp_tgasu@mail.ru; г. Томск
Деттярев В.В., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); ngasu_gts@mail.ru; г. Новосибирск
Дзюбо В.В., докт. техн. наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения ТГАСУ; dzv1956@mail.ru; г. Томск
Ефименко В.Н., докт. техн. наук, профессор кафедры автомобильных дорог ТГАСУ; svefimenko_80@mail.ru; г. Томск
Ефименко С.В., докт. техн. наук, проректор по научной работе ТГАСУ; svefimenko_80@mail.ru; г. Томск
Есаулов Г.В., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, проректор по научной работе МАРХИ; gvesaulov@raasn.ru; г. Москва
Жерардо М.Ч., докт. наук, профессор инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO; g.cennamo@uninettunouniversity.net; г. Рим, Италия
Ильичев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН; ilyichev@raasn.ru; г. Москва
Инжутов И.С., докт. техн. наук, профессор, директор инженерно-строительного института СФУ; iinzhutov@sfu-kras.ru; г. Красноярск
Кнайка Б.М., докт. техн. наук, профессор факультета проектирования зданий, сооружений и геотехники Политехнического университета Турина; bernardino.chiaia@polito.it; г. Турин, Италия
Ковлер К.Л., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных материалов и технологий Технион – Израильский технологический институт; cvrkost@technion.ac.il; г. Хайфа, Израиль
Копаница Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ; kopanitsa@mail.ru; г. Томск
Кудяков А.И., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, советник РААСН; kudyakov@tsuab.ru; г. Томск
Кумпак О.Г., докт. техн. наук, профессор кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ, советник РААСН; kumpyak@yandex.ru; г. Томск
Лежава И.Г., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, профессор МАРХИ; lezhavailia@gmail.com; г. Москва
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ; morozov@spbgasu.ru; г. Санкт-Петербург
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ; ovssn@tsuab.ru; г. Томск
Плачиди Л.Л., докт. наук, доцент инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO; luca.placidi@uninettunouniversity.net; г. Рим, Италия
Поляков Е.Н., докт. искусствоведения, канд. архитектуры, профессор кафедры теории и истории архитектуры ТГАСУ, член Союза архитекторов России; polyakov-en@ya.ru; г. Томск
Пустоветов Г.И., докт. архитектуры, профессор, чл.-корр. РААСН, советник ректората НГУАДИ; pustovetovgi@gmail.com; г. Новосибирск
Сколубович Ю.Л., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ректор НГАСУ (Сибстрин); sjl1964@mail.ru; г. Новосибирск
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН; travush@mail.ru; г. Москва
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ; nac@tsuab.ru; г. Томск
Чернышов Е.М., докт. техн. наук, председатель президиума Центрального отделения РААСН, академик РААСН; chem@vgasu.vrn.ru; г. Воронеж
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН; niisf@niisf.ru; г. Москва
Яненко А.П., докт. техн. наук, профессор кафедры гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин); ngasu_gts@mail.ru; г. Новосибирск

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.tsuab.ru>

Научное издание

ВЕСТНИК ТГАСУ № 5 – 2022

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, Г.Г. Семухина. Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш. Технический редактор Н.В. Удлер.
Подписано в печать 24.10.2022. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 13,85. Усл. печ. л. 16,45. Тираж 200 экз.
Зак. № 95.

Дата выхода: 28.10.2022.
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, 2022

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL

OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 24

№ 5 2022
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

[illegible]

EDITORIAL STAFF

Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Chief Editor, Head of Structural Mechanics Dept., TSUAB; lls@tsuab.ru, Tomsk, Russia
Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Chief Academic Secretary; pavel.akimov@gmail.com, Moscow, Russia
Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Director General Research Center StaDiO; amb@stadyo.ru, Moscow, Russia
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; niitag@yandex.ru, Moscow, Russia
Chernyshov E.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Chairman of the Presidium of RAACS Central Regional Branch; chem@vgasu.vrn.ru, Voronezh, Russia
Chiaia B., PhD, Professor, Politecnico di Torino (Polytechnic University of Turin); bernardino.chiaia@polito.it, Turin, Italy
Degtyarev V.V., DSc, Professor, Head of Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; ngasu_gts@mail.ru, Novosibirsk, Russia
Dzyubo V.V., DSc, Professor, Department of Water Supply and Sewage Systems, TSUAB; dzv1956@mail.ru, Tomsk, Russia
Efimenko V.N., DSc, Professor, Automobile Roads Dept., TSUAB; svefimenko_80@mail.ru, Tomsk, Russia
Efimenko S.V., DSc, Vice-Rector for Research, TSUAB; svefimenko_80@mail.ru, Tomsk, Russia
Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy); esaulovgv@raasn.ru, Moscow, Russia
Girardot M.C., DSc, Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; g.cennamo@uninettunouniversity.net, Roma, Italy
Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB; tsp_tgasu@mail.ru, Tomsk, Russia
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President; ilyichev@raasn.ru, Moscow, Russia
Inzhutov I.S., DSc, Professor, Director School of Engineering and Construction, SibFU; iinzhutov@sfu-kras.ru, Krasnoyarsk, Russia
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies Dept., TSUAB; kopanitsa@mail.ru, Tomsk, Russia
Kovler K., A/Professor, Civil and Environmental Engineering, Head of Building Materials, Performance & Technology Dept., Technion Israel Institute of Technology; cvrkost@technion.ac.il, Haifa, Israel
Kudiyakov A.I., DSc, Professor; RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB (Tomsk, Russia); kudiyakov@tsuab.ru
Kumpyak O.G., DSc, Professor; RAACS Adviser, Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB; kumpyak@yandex.ru, Tomsk, Russia
Lezhava I.G., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow Architectural Institute (State Academy); lezhavailia@gmail.com, Moscow, Russia
Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE; morozov@spbgasu.ru, St-Petersburg, Russia
Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB; ovssn@tsuab.ru, Tomsk, Russia
Plachidi L.L., DSc, A/Professor, Engineering Dept., International Telematic University UNINETTUNO; luca.placidi@uninettunouniversity.net, Roma, Italy
Polyakov E.N., DArts, Professor; Member of the Union of Architects of Russia; Theory and History of Architecture Dept., TSUAB; polyakov-en@ya.ru, Tomsk, Russia
Pustovetov G.I., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Adviser Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts; pustovetovgi@gmail.com, Novosibirsk, Russia
Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; sjl1964@mail.ru, Novosibirsk, Russia
Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS; niisf@niisf.ru, Moscow, Russia
Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB; nac@tsuab.ru, Tomsk, Russia
Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician; travush@mail.ru, Moscow, Russia
Vlasov V.A., DSc, Professor, Rector, TSUAB; rector@tsuab.ru, Tomsk, Russia
Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB; vgg-tomsk@mail.ru, Tomsk, Russia
Yanenko A.P., DSc, Professor, Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; ngasu_gts@mail.ru, Novosibirsk, Russia

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 № 5 – 2022
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, G.G. Semukhina. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 24.10.2022. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 28.10.2022.
Published sheets: 13,85. Conventional printed sheets: 16,45. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 95.

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, 2022

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Волынец Е.И. Типология жилой деревянной исторической застройки Тобольской губернии конца XIX – начала XX в. (ТИУ, г. Тюмень).....	9
Каширипур М.М. Смарт-урбанизм во время пандемии (на примере COVID-19) (БНТУ, Республика Беларусь, г. Минск).....	23
Александрова Г.И., Карелин Д.В. Параметры качества средового пространства в аспекте инженерного благоустройства (НГАСУ, г. Новосибирск).....	38
Гурьева Е.И., Воробьев В.А. Современные тенденции развития общественных спортивных зон в локальной градостроительной среде (ВГТУ, г. Воронеж)	48
Иевлева О.Т., Чикаев И.И. Структуризация творческого процесса формирования архитектурных решений фасадов зданий (ЮФУ, г. Ростов-на-Дону)	62

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Гребенюк Г.И., Максак В.И., Вешкин М.С. Двухэтапный процесс оптимизации упругих стержневых систем при импульсом нагружении и варьировании параметров сечений элементов и дополнительных узловых масс (ТГАСУ, г. Томск, НГАСУ, г. Новосибирск).....	70
Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р. Метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении (ТГАСУ, г. Томск).....	81
Чайкин Е.А., Деордиев С.В. Результаты испытаний на сжатие и растяжение деревянного элемента с клееными стальными пластинами (СФУ, г. Красноярск)	98
Кумпяк О.Г., Мещеулов Н.В. Особенности динамического деформирования сжато-изогнутых конструкций балочного типа на податливых опорах (ТГАСУ, г. Томск).....	108

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Аниканова Л.А., Старенченко В.А. Термодинамическое моделирование гидратации портландцемента с разным содержанием воды (ТГАСУ, г. Томск).....	122
---	-----

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Суглобов Д.А., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Особенности проектирования сетей канализации в арктических условиях (ТИУ, г. Тюмень, ТГАСУ, г. Томск)	133
--	-----

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Колмогоров С.Г., Клемяционок П.Л., Колмогорова С.С. К вопросу уплотнения переувлажненных глинистых грунтов (ПГУПС, г. Санкт-Петербург).....	145
--	-----

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

Матвиенко О.В., Литвинова А.Е., Фирсанова Н.С. Исследование структуры течения полимерно-битумного вяжущего, описываемого моделью Кросса, в трубе с внезапным расширением (ТГАСУ, НИ ТГУ, г. Томск)	151
Семухин Б.С. Исследование полей напряжений в стальных автодорожных мостах (ТГАСУ, г. Томск)	169
Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокшин Р.И. Влияние технологии производства на асфальтогенез в дисперсно-армированных битумоминеральных композициях (ТГАСУ, г. Томск)	178

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Volynets E.I. Historic wooden architecture typology in Tobolsk late in the 19th and early 20th centuries (Tyumen).....	9
Kashiripoor M.M. Smart urbanism during the COVID-19 pandemic (Minsk, Republic of Belarus)	23
Aleksandrova G.I., Karelin D.V. Quality parameters of environmental space in engineering redevelopment (Novosibirsk)	38
Gur'eva E.I., Vorob'ev V.A. Current trends in the development of public sports areas in urban environment (Voronezh).....	48
Ievleva O.T., Chikaev I.I. Structuring the creative formation process of building facade architecture (Rostov-on-Don).....	62

BUILDING AND CONSTRUCTION

Grebenyuk G.I., Maksak V.I., Veshkin M.S. Two-stage optimization of elastic rod systems under pulse loading, variable parameters of element sections and additional nodal masses (Tomsk, Novosibirsk).....	70
Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R. Numerical calculation of reinforced concrete beams with spacing on compliant supports under dynamic load (Tomsk).....	81
Chaikin E.A., Deordiev S.V. Compression and tension tests of wooden elements with glued steel plates (Krasnoyarsk).....	98
Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Dynamic deformability of oblique sections of compressed reinforced concrete beams on yielding supports (Tomsk).....	108

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Anikanova L.A., Starenchenko V.A. Thermodynamic simulation of Portland cement hydration with different water content (Tomsk)	122
--	-----

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Suglobov D.A., Vyalkova E.I., Osipova E.Yu. Wastewater system design in arctic conditions (Tyumen, Tomsk).....	133
---	-----

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Kolmogorov S.G., Klemysionok P.L., Kolmogorova S.S. Toward compaction of overmoistured clay soil (Saint-Petersburg)	145
--	-----

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

Matvienko O.V., Litvinova A.E., Firsanova N.S. The Cross model of liquid polymer-bitumen binder structure in a pipe with sudden expansion (Tomsk)	151
Semukhin B.S. Stress fields in steel bridges (Tomsk)	169
Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Manufacture-affected asphaltene genesis in dispersion hardened bitumen-mineral compositions (Tomsk)	178

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 728.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-9-22

Е.И. ВОЛЫНЕЦ,

Тюменский индустриальный университет

ТИПОЛОГИЯ ЖИЛОЙ ДЕРЕВЯННОЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ ТОБОЛЬСКОЙ ГУБЕРНИИ КОНЦА XIX – НАЧАЛА XX В.

Аннотация. Статья посвящена архитектурной типологии деревянной исторической застройки в городах и сельских поселениях Тобольской губернии.

Изучен иконографический материал, сделаны натурные исследования, проведены обмеры и фотофиксация объектов.

Аналитический материал позволил выделить основные типы деревянных жилых домов конца XIX – начала XX в. с точки зрения их конструктивных и объемно-планировочных решений.

Даны определения и основные отличительные признаки исследуемых объектов, приведены примеры архитектурной типологии жилой деревянной исторической застройки Тобольской губернии конца XIX – начала XX в.

Ключевые слова: типология, деревянный жилой дом, конец XIX – начало XX в., Тобольская губерния

Для цитирования: Волынец Е.И. Типология жилой деревянной исторической застройки Тобольской губернии конца XIX – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 9–22.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-9-22

E.I. VOLYNETS,

Industrial University of Tyumen

HISTORIC WOODEN ARCHITECTURE TYPOLOGY IN TOBOLSK LATE IN THE 19th AND EARLY 20th CENTURIES

Abstract. The article is devoted to the architecture typology of historical wooden buildings in cities and rural settlements of the Tobolsk province. The research results can be used for studying related topics in the field of restoration and reconstruction of historical and architectural heritage. The research materials were iconographic data, books, articles and dissertations

on the topic. Approaches include the field surveys, measurements and photographs of objects. As a result, the analytical material allows identifying the main types of wooden residential buildings late in the 19th and early 20th centuries in terms of their constructive and space-planning solutions. Definitions are given to the objects at issue, examples of the architectural typology of wooden historical buildings in the Tobolsk province late in the 19th and early 20th centuries.

Keywords: typology, wooden residential building, Tobolsk province

For citation: Volynets E.I. Tipologiya zhiloi derevyannoi istoricheskoi zastroyki Tobol'skoi gubernii kontsa 19 – nachala 20 v. [Historic wooden architecture typology in Tobolsk late in the 19th and early 20th centuries]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 9–22.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-9-22

Наследие Тобольской губернии до сих пор мало изучено. Именно здесь до настоящего времени, хоть и не в полном объёме, сохранились уникальные деревянные жилые постройки конца XIX – начала XX в., ценность народного зодчества России. Изучением исторической застройки в Тобольской губернии и в Сибири занимались: Е.А. Ащепков, С.Н. Баландин, В.Т. Горбачёв, А.Н. Гуменюк, В.Г. Залесов, Д.В. Карелин, И.В. Куликова и др.

Во второй половине XIX – начале XX в. в Сибири произошли значительные изменения в социально-политической, культурной и хозяйственно-экономической жизни [5]. Это, в свою очередь, оказало влияние на развитие архитектуры. Жилищной проблемой во второй половине XIX – начале XX в. в России преимущественно занимались частные застройщики, государство же отчасти решало эту проблему, предоставляя ведомственные квартиры и дешёвое жильё для бедных [Там же].

После заселения Тобольской губернии в течение столетия не было построено ни одного каменного здания. Ввиду своей доступности на этой территории дерево было основным строительным материалом. Изначально постройки мало отличались от тех, которые возводили первые переселенцы на родине, но со временем, благодаря особенностям климата, географическому расположению и этническому разнообразию населения, деревянная застройка приобретает свои уникальные черты [1].

Государственное регулирование строительства началось в XVI – начале XVII в., в основном из-за участвовавших пожаров, что повлекло за собой активное возведение каменных построек. В первую очередь это касалось столичных городов, провинциальные же долгое время оставались без особого внимания. Частые пожары, которые уничтожали значительные участки городов, в конце концов «обратили» на себя внимание властей. Таким образом, с г. Астрахани началось регулирование застройки в провинциальных городах: во-первых, запретили строить деревянные дома слишком близко друг к другу, во-вторых, уже к началу XIX в. строения из дерева практически полностью вытеснялись на окраину городов, а центр формировался из камня [4].

Первоначально в Сибири срубы делали переселенцы, которые обладали определёнными навыками в строительной сфере. Впоследствии они начали

привлекать и обучать местное население, ими выполнялись практически все работы по строительству зданий центральных районов городов. В XIX в. увеличился объём жилого строительства и усилился контроль со стороны государства при застройке центральных кварталов. Это требовало привлечения квалифицированных мастеров, что стало причиной создания «ремесленных домов», там готовились специалисты по основным строительным ремёслам [2].

В течение сравнительно короткого времени, до середины XIX в., мастерами были разработаны уникальные местные объёмно-планировочные, декоративные и конструктивные приёмы. Типология жилого дома определялась на основе природно-климатических и социально-экономических условий отдельных районов Тобольской губернии [2]. Благодаря тому, что в тот временной промежуток жилое строительство было наиболее массовым и в большей степени сохранилось до нашего времени, создаются благоприятные условия для разработки уникальной для Тобольской губернии типологии деревянной жилой исторической застройки.

В отдельных городах Сибири деревянная историческая застройка уже изучена, в том числе разработана типология жилого дома. Тема отражена в трудах авторов: И.В. Куликовой в г. Томске; А.Н. Гуменюк в г. Омске, М.Г. Меевича в г. Иркутске, Е.Е. Грачёвой в г. Нижнем Новгороде и др. [6–9]. Типология в Тобольской губернии сохраняет общий классификационный облик Сибири, а также к середине XIX в. приобретает свои уникальные черты.

К этому времени в Тобольске и Тюмени формируются профессиональные мастерские, в которых плотники, резчики и декораторы разрабатывают свои индивидуальные способы обработки дерева и возведения зданий, создают новые декоративные решения, в которых они основываются на народной архитектуре и применяют местные традиции, таким образом, появляются новые направления. С середины XIX в. знания, традиции и местные черты распространяются на новые поселения Тобольской губернии, где местные мастера на основе полученных знаний применяют свои индивидуальные приемы при проектировании и декоративном оформлении домов [2].

Основа любого здания из дерева – это связанный ряд брёвен (венец), он ограничен длиной бревна, кладка может увеличиваться по вертикали путём накладывания одного венца на другой [1].

Типология жилого дома по конструктивному типу в Тобольской губернии представлена в виде «однокамерных» срубов, «пятистенков», «шестистенков», «крестовых» построек и деревянных зданий с «ложным перерубом» (рис. 1). Подобная типология представлена в материалах исследования института «Сибспецпроектреставрация» (Тюменский филиал). Такое жильё могло быть одноэтажным, двухэтажным и на подклети. Нередко использовались пристройки под односкатными, двухскатными крышами или с общей крышей для основной части дома и пристройки. Конструктивная особенность крыш – стропильная система для двухскатных или четырёхскатных крыш. Более развитые и поздние представители, чаще всего двухэтажные, могли иметь сложную конфигурацию крыши (рис. 1).

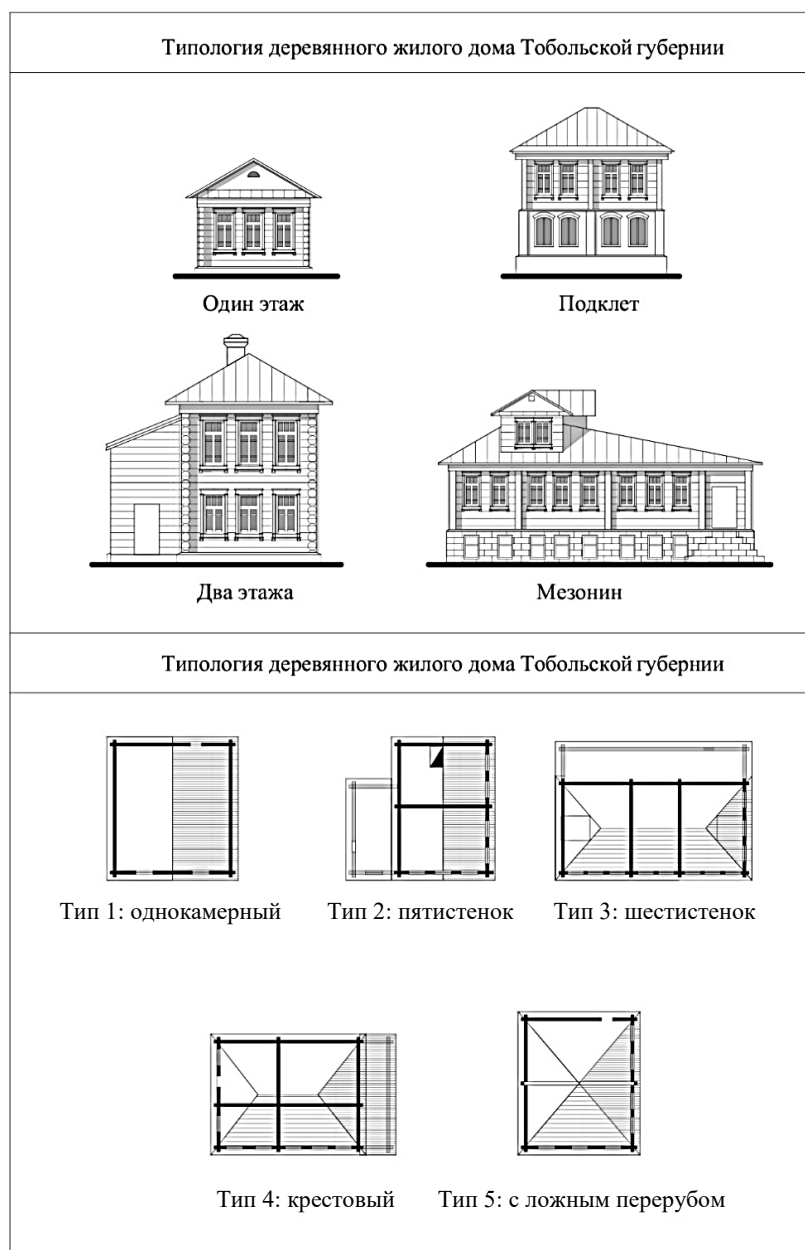


Рис. 1. Типология исторической застройки Tobольской губернии

В качестве отопления использовалась одна или несколько печей, в зависимости от размера сруба. В маленьких постройках печь могла занимать большую часть избы и применялась не только для отопления, но и для приготовления еды.

Первоначально способы обработки дерева заметно уступали современным технологиям. Плотники старались не соединять брёвна в длину, поэтому

размер сруба часто определялся длиной строительного материала (8–10 м). С течением времени технология строительства позволяла использовать новые материалы, способы и приёмы обработки дерева, поэтому развивался и конструктивный тип дома, он становился больше и конструктивно сложнее. Высота жилого здания определялась числом и величиной венцов [1].

Самый простой в конструктивном решении тип деревянного дома – «однокамерный». Е.А. Ащепков в своём труде «Русское народное зодчество в Западной Сибири» характеризует его как изба-клеть. Он формируется как прямоугольный объём из четырёх несущих стен. Особенность такого типа заключается в отсутствии дополнительных несущих конструкций внутри помещения. На первоначальном этапе развития по габаритам дом был приближен к квадрату со сторонами, соответствующими размеру брёвен (в пределах 6–10 м). Более старые представители этого типа выглядели монументальнее, потому что со временем строители начали использовать брёвна меньшего диаметра [Там же].

В Тобольской губернии распространена одна из разновидностей «однокамерного» типа, когда к простому прямоугольному объёму примыкают сени, т. е. пристройка. Она может располагаться сбоку от главного фасада (главный фасад – обращённый на главную улицу) или на заднем дворе. Нередко использовалось две и более пристройки в одном здании. При наличии дополнительного объёма вход в сруб осуществлялся через него (рис. 2).

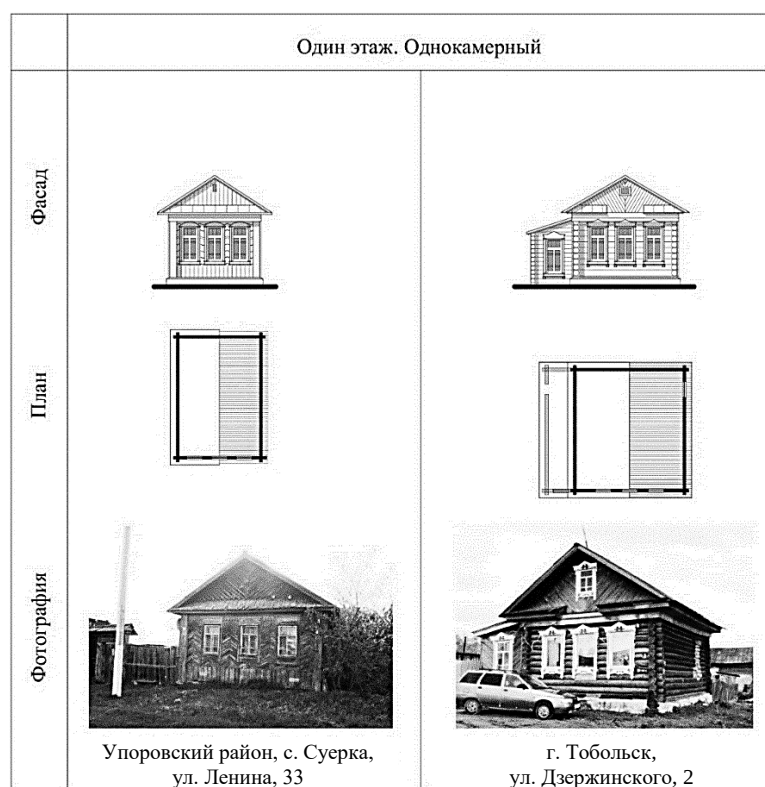


Рис. 2. Деревянный жилой дом в Тобольской губернии по типу «однокамерный» сруб

Так, например, в с. Суерка Упоровского района по ул. Ленина, 33, расположен «однокамерный» жилой дом под двускатной крышей. Здание по ул. Дзержинского, 2, в г. Тобольске – «однокамерное» деревянное строение с пристройкой под двухскатной крышей.

Следующий тип деревянного жилого дома – «пятистенок». Он представляет собой прямоугольный в плане сруб с поперечной или продольной в плане несущей стеной внутри помещения. Чаще всего стена делила здание на две неравные части, в большей части помещения устраивали избу или горницу, в меньшей – сени или жилую комнату. В одной из частей обустраивалась кухня с русской печью, она обогревала оба помещения. При таком конструктивном решении на главном и заднем фасадах появлялся переруб, который делил фасад на симметричные или неравные части.

У «пятистенков» нередко делали пристройку, и так же, как и у «однокамерных», вход в сруб осуществлялся через неё. С точки зрения типологии пристройки, так же, как и у «однокамерных» зданий, могли располагаться на заднем и боковых фасадах. Это наиболее распространённый тип жилых деревянных домов в Тобольской губернии (рис. 3).

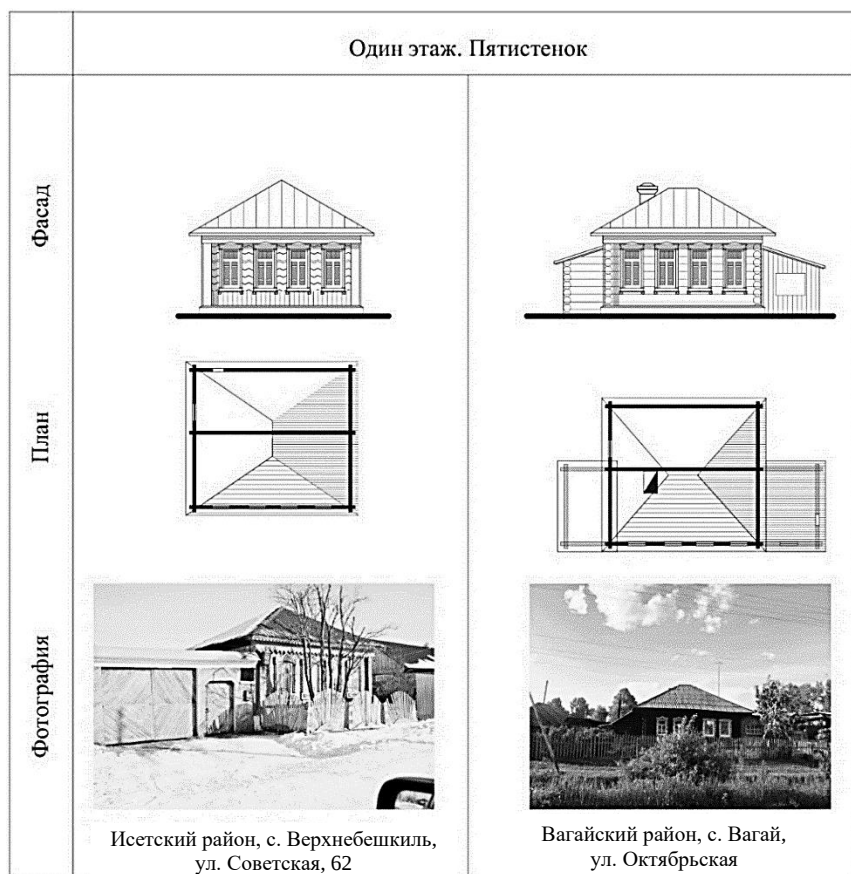


Рис. 3. Деревянный жилой дом в Тобольской губернии по типу «пятистенок»

Более развитый тип жилого дома – «шестистенок», который, в отличие от «однокамерного» и «пятистенка», более вытянут в плане. Для того чтобы расположить более вытянутое пространство, необходима дополнительная несущая стена, отсюда и возникновение этого конструктивного решения. «Шестистенок» представляет собой прямоугольный объём из четырёх несущих стен с двумя внутренними, капитальными, расположенными параллельно друг другу. Нередко в данном типе делали пристройки (рис. 4).

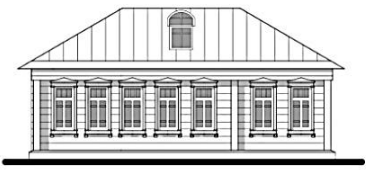
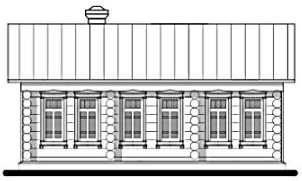
Один этаж. Шестистенок		
Фасад		
		
	 г. Тобольск, ул. М. Джагиля, 9	 Исетский район, д. Решетникова, ул. Свободы, 18

Рис. 4. Деревянный жилой дом в Тобольской губернии по типу «шестистенок»

Следующий, более поздний – «крестовой тип», представляет собой прямоугольный сруб с пересекающимися внутри помещения стенами. Таким образом в плане образуются четыре самостоятельных помещения. Размер «крестового» сруба чаще всего был больше, чем другие типы домов, поэтому нередко в нём располагали более одной печи для отопления помещений. Чаще всего форма здания в плане была приближена к квадратной, а сруб перекрывался четырёх-

скатной крышей. Е.А. Ащепков называл данный тип «шестистенком», но нередко в крестовых домах встречались три капитальные стены внутри помещения (образуется в общей сложности семь несущих стен), кроме этого, в Тобольской губернии обнаружен «шестистенок», в котором несущие стены не пересекаются, таким образом, можно выделить «крестовой» дом и «шестистенок» в два разных типа. У «крестового» здания также могли быть пристройки (рис. 5).

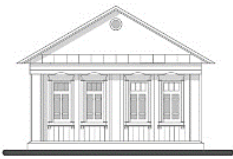
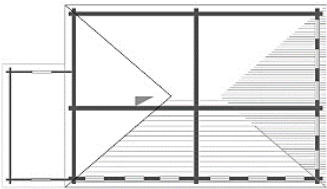
Один этаж. Крестовой		
Фасад		
		
	 г. Тобольск, ул. Хохрякова, 39	 г. Ишим, ул. Гагарина, 40

Рис. 5. Деревянный жилой дом в Тобольской губернии по типу «крестовой»

Особенность типологии жилого дома в Тобольской губернии – сруб «с ложным перерубом», тип деревянного сооружения, в котором несущую функцию выполняют четыре ограждающие стены, внутреннюю несущую конструкцию несут деревянные балки. Такой тип мог быть выполнен по принципу «ложного пятистенка», «ложного шестистенка» или «ложного крестового» дома. Внутренняя планировка может быть более разнообразной ввиду того, что внутренние пространства не перегораживают несущие стены. Пристройки также не являются исключением для данного типа жилого дома (рис. 6).

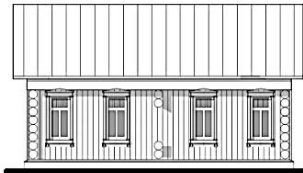
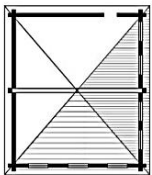
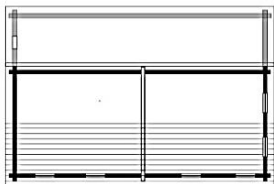
	Один этаж. С ложным перерубом	
Фасад		
План		
Фотография	 г. Ишим, ул. Карякина, 56	 Упоровский район, с. Упорово, ул. Володарского, 53

Рис. 6. Деревянный жилой дом в Тобольской губернии по типу «с ложным перерубом»

Один из видов жилых домов в Тобольской губернии – «на подклети». Он представляет собой деревянный жилой дом, расположенный на каменном или деревянном полуэтаже, чаще всего предназначенный для складских помещений. Наиболее распространённая разновидность этого типа – «крестовой» или «крестовой с пристройкой» на подклети. Также встречается «пятистенок с пристройкой» на подклети, например в г. Ишиме по адресу ул. Пушкина, 10 (рис. 7). Такой тип наиболее распространён в городах, в сельских поселениях встречается намного реже. Тем не менее в с. Липиха Упоровского района это достаточно распространённый тип, он является характерной особенностью этого поселения [3].

Двухэтажные жилые дома в Тобольской, как и в Томской губернии, на законодательном уровне разрешили строить только к 1862 г., и только в 1864 г. двухэтажные жилые дома разрешили строить повсеместно [4]. В Тобольской губернии двухэтажные жилые дома представлены четырьмя основными

типами: «пятистенок с пристройкой», «шестистенок с пристройкой», «крестовой» и «крестовой с пристройкой». Среди более ранних типов двухэтажных жилых домов встречались «однокамерные» и «однокамерные с пристройкой», но представителей второй половины XIX – начала XX в. таких типов не обнаружено. Это связано с развитием конструкции сруба и потребностями его жителей в большем пространстве.

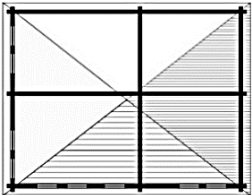
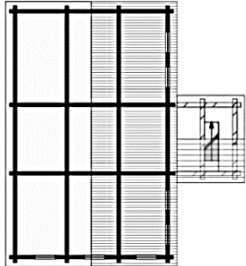
	На подклети. Крестовой	
Фасад		
План		
Фотография	 Упоровский район, с. Липиха, ул. Советская (Центральная), 19	 г. Тобольск, ул. Пушкина, 38

Рис. 7. Деревянный жилой дом в Тобольской губернии по типу «крестовой» (на подклети)

При наличии пристройки лестница в жилом доме располагалась преимущественно в ней. При отсутствии пристройки лестница, как и вход в жилой дом, чаще всего располагались на дворовом фасаде (рис. 8).

Жилой дом с мезонином также характерен для городской застройки. В сельских поселениях данный тип не обнаружен. Один из примеров такого здания – в г. Тюмени по ул. Дзержинского, 20. Дом Н.О. Сергеева выстроен в 1909 г.

Одноэтажный жилой дом с мезонином примечателен объёмно-пространственной композицией. Мезонин усложнён навесным балконом. Крыша представляет собой шатровые башенки, покрытые металлической чешуёй. Окна выполнены в характере модерна: полуовальные по форме, с мягкими очертаниями фрамуги. Вход в дом организован с центрального и дворового фасадов [3].

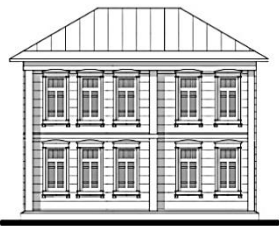
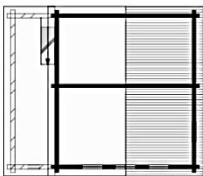
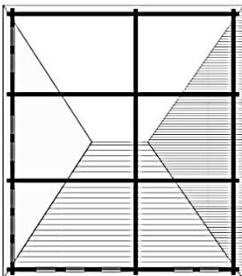
	Два этажа. Пятистенок	Два этажа. Крестовой
Фасад		
План		
Фотография	 г. Тобольск, ул. Вершина, 22	 Упоровский район, с. Упорово, ул. Советская, 22

Рис. 8. Деревянный двухэтажный жилой дом в Тобольской губернии по типу «пятистенок» и «крестовой»

Дом А.И. Колокольникова по ул. Челюскинцев, 1/Дзержинского, 6 – деревянный сруб на каменном подклете с крестообразным мезонином – по стилистике относится к позднему классицизму последней трети XIX в. Так же, как и в предыдущем доме, вход в здание расположен с главного и дворового фасадов [3] (рис. 9).

Таким образом, в городах и сельских поселениях Тобольской губернии были распространены следующие типы конструктивных решений жилых домов:

«однокамерные» (клеть), «пятистенки», «шестистенки», «крестовые» и «с ложным перерубом». В свою очередь, жилой деревянный дом мог быть в один этаж, на подклети (каменный или деревянный полуэтаж). С развитием архитектуры и потребности жителей в большей площади появились жилые дома в два этажа, которые в большей степени характерны для городской застройки. До момента, пока официально не разрешили строить жилые дома в два этажа, строили дома с мезонином с целью увеличения площади дома, но при этом не нарушали закон [4]. В сельских поселениях наибольшее распространение получили одноэтажные строения, тем не менее, редко, но встречаются жилые дома в два этажа.

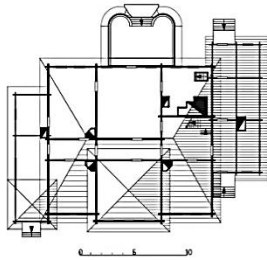
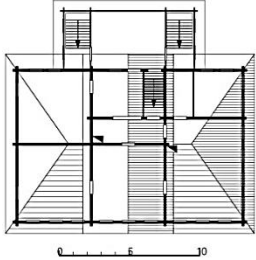
	Мезонин	
Фасад		
План		
Фотография	 г. Тюмень, ул. Дзержинского, 12	 г. Тюмень, ул. 25 Октября, 42/Орджоникидзе, 2

Рис. 9. Деревянный жилой дом в Тобольской губернии с мезонином

Городская рядовая жилая застройка отличается большим разнообразием, чем сельская. В городе намного чаще встречаются двухэтажные жилые дома и на подклети, а срубы с мезонином характерны только для городской застройки [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ащепков Е.А.* Русское народное зодчество Западной Сибири. Москва : Изд-во академии архитектуры СССР, 1950. 126 с.
2. *Оглы Б.И.* Формирование центров крупных сибирских городов. Градостроительные и социально-культурные аспекты. Новосибирск : Изд-во Новосибирского ун-та, 1999. 169 с.
3. *Козлова-Афанасьева Е.М.* Архитектурное наследие Тюменской области. Тюмень, 2008. 488 с.
4. *Залесов В.Г.* Деревянная застройка городов Сибири в строительном законодательстве России в XIX – начале XX в. // Баландинские чтения. Новосибирск : Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств, 2014. С. 189–195.
5. *Залесов В.Г., Куликова И.В.* Архитектура деревянных доходных домов Томска (конец XIX – начало XX в.). Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. 420 с.
6. *Куликова И.В.* Архитектура деревянного доходного дома города Томска: вторая половина XIX – начало XX в. : специальность 05.23.20 : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Куликова Ирина Владимировна ; Новосибирск. гос. ун-т. Новосибирск, 2006. 434 л.
7. *Меерович М.Г.* Деревянное наследие архитектуры г. Иркутска – уникальная историко-культурная и художественная ценность. URL: <https://xn--80aaaggefb2ao4bvghgf6qzb.xn--p1ai/m-g-meerovich-derevyannoe-nasledie-arhitektury-g-irkutska-unikal>
8. *Грачёва Е.Е.* Архитектура деревянных и каменно-деревянных жилых домов Нижнего Новгорода XIX начала XX вв. : специальность 05.23.20 : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Грачёва Елена Евгеньевна ; Нижегородский гос. ун-т. Нижний Новгород, 2014. 193 с.
9. *Гуменюк А.Н.* Архитектура Омска XIX – начала XX веков : специальность 17.00.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата искусствоведения / Гуменюк Алла Николаевна. Санкт-Петербург, 2002. 486 с.

REFERENCES

1. *Ashchepkov E.A.* Russkoe narodnoe zodchestvo Zapadnoi Sibiri [Russian folk architecture of Western Siberia]. Novosibirsk, 1950. 126 p. (rus)
2. *Ogly B.I.* Formirovanie tsentrov krupnykh sibirskikh gorodov. Gradostroitel'nye i sotsial'no-kul'turnye aspekty [Formation of centers in large Siberian cities. Urban planning and socio-cultural aspects]. Novosibirsk, 1999, 169 p. (rus)
3. *Kozlova-Afanasyeva E.M.* Arkhitekturnoe nasledie Tyumenskoi oblasti [Architectural heritage of the Tyumen region]. Tyumen, 2008. 488 p. (rus)
4. *Zalesov V.G.* Derevyannaya zastroyka gorodov Sibiri v stroitel'nom zakonodatel'stve Rossii v 19 – nachale 20 v [Wooden buildings of Siberian cities in the construction legislation of Russia in the 19th and early 20th centuries]. In: *Balandinskie chteniya (Coll. Papers in memory of S.N. Balandin 'Balandin Readings')*, 2014. Pp. 189–195. (rus)
5. *Zalesov V.G., Kulikova I.V.* Arkhitektura derevyannykh dokhodnykh domov Tomska (konets XIX – nachalo XX v.) [Architecture of wooden houses in Tomsk (late 19th and early 20th centuries)]. Tomsk: TSUAB, 2016. 420 p. (rus)
6. *Kulikova I.V.* Arkhitektura derevyannogo dokhodnogo doma goroda Tomska: vtoraya polovina 19 – nachalo 20 v.: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata arkitektury [Architecture of wooden house in Tomsk in the 19–20th centuries. PhD Thesis]. Novosibirsk, 2006. 434 p. (rus)
7. *Meerovich M.G.* Derevyannoe nasledie arkitektury g. Irkutska – unikal'naya istoriko-kul'turnaya i khudozhestvennaya tsennost' [Wooden architecture heritage of Irkutsk is a unique historical, cultural and artistic value]. Available: <https://xn--80aaaggefb2ao4bvghgf6qzb.xn--p1ai/m-g-meerovich-derevyannoe-nasledie-arhitektury-g-irkutska-unikal> (accessed September 3, 2022)
8. *Gracheva E.E.* Arkhitektura derevyannykh i kamunno-derevyannykh zhilykh domov Nizhnego Novgoroda XIX nachala XX vv.: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata arkitektury [Architecture of wooden and stone-wooden residential buildings in Nizhny Novgorod in the 19th and early 20th centuries. PhD Thesis]. Nizhny Novgorod, 2014. 193 p. (rus)

9. *Gumenyuk A.N. Arkhitektura Omska 19 – nachala 20 vekov: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata iskusstvovedeniya* [Architecture of Omsk in the 19th and early 20th centuries. PhD Thesis]. Saint-Petersburg, 2002. 486 p.(rus)

Сведения об авторе

Волынец Екатерина Игоревна, ассистент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, architect.volynets@gmail.com

Author Details

Ekaterina I. Volynets, Assistant Lecturer, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, architect.volynets@gmail.com

УДК 71.711

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-23-37

*М.М. КАШИРИПУР,**Белорусский национальный технический университет*

СМАРТ-УРБАНИЗМ ВО ВРЕМЯ ПАНДЕМИИ (НА ПРИМЕРЕ COVID-19)

Аннотация. Представленное исследование делает попытку предсказать возможные влияния и последствия современной градостроительной концепции (смарт-урбанизм) во время пандемии коронавируса (COVID-19). Статья раскрывает более подробно концепцию смарт-урбанизма, принципы, применяемые в мировой практике в период пандемии COVID-19, освещает специфику проектов, которые относятся к концепту смарт-урбанизма. В статье представлены преимущества и недостатки смарт-урбанизма в пандемической ситуации.

Актуальность исследования: изучение современной градостроительной концепции (смарт-урбанизма) в пандемическое время и ее преимущества и недостатки в решении проблем в таких условиях.

Цель исследования: изучение современных тенденций градостроительного проектирования, их эффективности и недостатков для решения проблем в пандемической ситуации (COVID-19). Надо отметить, что для достижения цели исследования необходимо определить термин смарт-урбанизма, его принципы и практику; выявить особенности пандемической ситуации, ее характеристики и нужды города в сложившийся период; применить решения данной концепции (смарт-урбанизма) в городах в пандемическое время.

В процессе исследования используется метод критического анализа научной литературы и документов, связанный с концепцией смарт-урбанизма и его применением во время пандемии для достижения и формирования выводов. Данное исследование заключается в изучении способностей концепции смарт-урбанизма и ее достижений для контроля пандемии в городе.

Научная новизна заключается в изучении и анализе градостроительной концепции умного города во время пандемии, ее преимуществ и недостатков для достижения контроля и нахождения решений в похожих ситуациях.

Ключевые слова: коронавирус, умные города, градостроительство, смарт-урбанизм, ИКТ, пандемия, COVID-19

Для цитирования: Каширипур М.М. Смарт-урбанизм во время пандемии (на примере COVID-19) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 23–37.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-23-37

*М.М. KASHIRIPOOR,**Belarusian National Technical University*

SMART URBANISM DURING THE COVID-19 PANDEMIC

Abstract. The present study attempts to predict the possible impacts and consequences of the modern urban concept (smart urbanism) during the coronavirus (COVID-19) pandemic. The article reveals the concept of smart urbanism in more detail, the principles applied in world practice during the COVID-19 pandemic, highlights the specifics of projects that relate to the concept of smart urbanism. The article presents the advantages and disadvantages of smart urbanism in a pandemic situation. *Relevance:* The study of the modern urban planning concept (smart urbanism) in a pandemic time and its advantages and disadvantages in solving problems

in such conditions. *Purpose*: The study of modern trends in urban design, their effectiveness and shortcomings for solving problems in a pandemic situation (COVID-19). It should be noted that in order to achieve the goals of the study, it is necessary to define the term smart urbanism, its principles and practice; identify the pandemic situation, its characteristics and the city's needs in the current situation; apply the solutions of this concept (smart urbanism) in cities during a pandemic. *Methodology*: Critical analysis, scientific literature and documents related to the concept of smart urbanism and its application during the pandemic to reach and draw conclusions. The concept of smart urbanism and pandemic control in the city. *Originality*: The study and analysis of the urban planning concept of a smart city during the pandemic, its advantages and disadvantages to achieve control and find solutions in similar situations.

Keywords: coronavirus, smart cities, urban planning, information and communications technologies, smart urbanism, pandemics, COVID-19

For citation: Kashirpoo M.M. Smart-urbanizm vo vremya pandemii (na primere COVID-19) [Smart urbanism during the COVID-19 pandemic]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 23–37.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-23-37

Введение

В начале 2020 г. человечество столкнулось с невиданной ранее угрозой – массовым распространением крайне вирулентной коронавирусной болезни с международным обозначением COVID-19. Распространение коронавируса происходило непосредственно при вдыхании вируса, при нахождении рядом с больным COVID-19 или при соприкосновении рук с зараженной поверхностью, либо через слизистые, либо рот. Вирус легче распространялся в помещении и людных местах. Во многих научных сферах и государственных органах начали анализировать текущую ситуацию, к которой в действительности не были готовы [1, 2]. Таким образом, во всем мире для стабилизации ситуации принимались жесткие временные ограничения, вплоть до закрытия многих общественных мест, городов и даже стран.

Многие научные сферы начали пересматривать свои концепции и их реализацию в похожей ситуации. Одними из первых столкнулись с пандемической ситуацией города и их правительства. Градостроители и архитекторы столкнулись с многочисленными проблемами, которые не учитывали до пандемии. Они начали проектировать многие города заново с новыми задачами, концепцией и методом проектирования. В это время было представлено несколько терминологий и методов проектирования, которые давали преимущество для контроля и борьбы с пандемической ситуацией. Проблема терминологического характера была связана с терминами «устойчивое развитие» и «смарт-урбанизм или умный город». Городов в мире, которые использовали данную терминологию для развития города, было мало, но их достижения в решении проблемы были велики в сравнение с другими городами.

Обзор многочисленной литературы доказывает, что использование развитой инфраструктуры, которая разработана в результате применения аспектов устойчивого развития, в том числе умного города, во время развития города, дало больше возможностей выйти из данной проблемы более легко и с меньшим ущербом, чем в других городах и странах. В этих городах была развита

инфраструктура, которая давала возможность управлять городом дистанционно в больших сферах деятельности. В таких городах минимизировали контакт между людьми с помощью ИКТ и заодно минимизировали ущерб жизни населению города. Большинство сфер жизни города, таких как школа и обучение, медицина, управление города, работа, услуги города, были под контролем и продолжали свою деятельность.

Надо отметить еще раз, что мир не был готов к пандемической ситуации и, несмотря на хорошие результаты борьбы с помощью использования градостроительной концепции и ее инфраструктуры, есть много недостатков, которые надо учитывать и исправить с целью неповторения их в дальнейшем в случае похожей ситуации.

Цель исследования заключается в изучении влияния пандемии коронавируса и его связи с градостроительной терминологией, что при более конкретной доработке поможет избежать пандемической ситуации. Особенности соответствующей терминологии – это «смарт-урбанизм, или умный город» (англ. smart urbanism) и проекты, связанные с данной концепцией.

Таким образом, задачи исследования представляют собой следующее:

- определение терминологии, принципов проектирования и практик умного города (смарт-урбанизм);
- характер и вопросы пандемической ситуации в городах;
- применение разных решений концепции умного города для устранения и минимизирования ущерба;
- выявление ключевых принципов умного города и их эффективное применение во время пандемии COVID-19;
- преимущества и недостатки использования данной концепции во время пандемии.

Методами исследования являются обзор и анализ научной литературы и их расшифровка, связанная с концепцией смарт-урбанизма, а также анализ применения этой концепции во время пандемии. Данное исследование можно использовать в ходе действий к подготовке градостроительного проектирования.

Основная часть

Коронавирусы – семейство вирусов, включающее на 2020 г. 45 видов. Известно 7 коронавирусов, поражающих человека. Никогда еще коронавирусы не приводили к пандемии. Обнаруженный SARS-CoV-2 – Betacoronavirus B вызвал вспышку коронавирусной инфекции, которая была впервые зарегистрирована 31 декабря 2019 г. в г. Ухань, Китай [2]. В описании патента отмечается, что вспышка этого вируса была обнаружена еще в 2003 г. в Китае, Гонконге и других странах, т. е. патент получен не на COVID-19. Распространенный по миру коронавирус, вызывающий пневмонию нового типа, охватил до марта 2020 г. 114 стран и был охарактеризован ВОЗ как пандемия COVID-19. По состоянию данных ООН на июль 2022 г. было зарегистрировано более 555 млн случаев данного заболевания во всем мире; свыше 6,3 млн чел. умерло и более 548,7 млн выздоровело. Пандемия COVID-19 стала по-настоящему всемирной проблемой, изменив жизни людей, став причиной социально-экономических потрясений [3]. Множество спортивных, религиозных, политических и куль-

турных мероприятий были перенесено или отменено. В 172 странах были закрыты учебные заведения, что коснулось примерно 98,5 % мирового населения школьного и студенческого возраста. Были закрыты границы многих государств, введены экстренные меры безопасности [4, 5].

Из-за жесткого карантина в ряде стран и регионов прошли протесты. Негативному влиянию подверглась как мировая экономика в целом, так и экономика отдельных стран и секторов рынка. В 90 % стран пандемия привела к серьезным сбоям в работе систем здравоохранения. Сегодня ученые всего мира работают над созданием тест-систем, лекарственных препаратов и вакцин, что в совокупности позволит спасти жизни миллионов людей и преодолеть пандемию. С конца 2020 г. в ряде стран уже началась массовая вакцинация против COVID-19, и, по данным ООН, на июль 2022 г. было поставлено более 12 млрд доз вакцинации.

Всемирная организация здравоохранения быстро признала эпидемиологическую ситуацию пандемией. Почти каждая страна в своих документах безопасности предусматривала возможность возникновения пандемии. Несмотря на это, ни одна страна не была готова для борьбы против распространения болезни. Самая сложная ситуация сложилась в Китае, Италии, Испании и США, хотя такая оценка является достаточно условной – другие страны также испытывали немалые проблемы.

Практически единственным общепринятым способом противодействия распространению болезни стал разрыв транзитных перемещений людей между странами, и даже внутренними регионами и городами, а также самоизоляция людей, прекращение некритичных для жизнеобеспечения производств, запрет массовых мероприятий, т. е. всего, что предполагало массовые скопления людей. Исключением может быть разве что Швеция, но и она ввела транзитные ограничения на въезд-выезд. Все это, конечно, стало дополнительным тормозом экономических процессов, особенно тех, которые зависят от внутреннего и внешнего транзита: туризм, пассажирские перевозки автомобильным, железнодорожным и воздушным транспортом, деятельность учреждений культуры и т. п.

Распространение COVID-19 определенным образом наслось на финансовый кризис на мировых фондовых рынках и нефтяной кризис – резкое падение цен на нефть.

Неважно, кем был создан этот вирус, как создан, для чего распространялся, кому эта ситуация более выгодна и т. д., самые большие задачи первого уровня для каждой научной сферы – это помощь и борьба за нераспространение вируса, обслуживание больных, сохранение здоровья людей и безопасных мест.

Последний пандемический опыт, его масштаб и ситуация в разных странах показали, что во всех странах мира не только не научились и не подготовились к таким масштабным ситуациям, а даже не была разработана универсальная методика для минимизирования ущерба для жизни людей с максимальной эффективностью обслуживания на разных уровнях распространения пандемии. Каждая страна использовала свои внутренние распоряжения и методики для борьбы с пандемией. Паника, которую поднимали самые обычные жители городов и стран, а также образованное в разных сферах науки население, не знали, что им делать для выхода из кризисной ситуации.

В такой ситуации обновление информации и ее доступность для всех жителей и обслуживающих органов с целью взаимодействия и контроля пандемии, а также эффективная работа всех органов играют ключевую роль для жизнедеятельности населения. В XXI в. эта проблема и обновление информации решаются через цифровую сферу и её качество. Эффективность зависит от программного обеспечения и проведения информации в цифровой сфере и развития её инфраструктуры. Таким образом, руководящие и контролирующие органы могут принять решение не только относительно обслуживания и контроля ситуации, но и пути выхода из критической ситуации и нормализации человеческой жизни. Термин «умный город» (Smart urbanism) в терминологии градостроительства наиболее близок к описанному подходу.

Умный город (Smart urbanism)

Большое значение в современной урбанистике имеет внедрение проектов, объединенных под названием Smart urbanism, которые, постепенно распространяясь в городах Западной Европы и США, демонстрируют немалый культурно-творческий потенциал в вопросе развития городского пространства и его влияния на жизнь современного городского населения. Smart urbanism (умный урбанизм) является одним из популярных и распространенных способов концептуализации будущего города.

Краткая история и определение. Умный город является одним из самых прогрессивных направлений в пределах современной урбанистики, имеющей тесную связь между различными сферами человеческой жизни, ведь он сочетает практику архитектурного планирования, перспектив социального, культурного развития.

Термин «умный город» предполагает существование иерархии, где одни города «умнее» других, и ставит планку или цель, которую следует достичь, продавая товары и услуги и мобилизуя жителей. Слово «умный» стратегически настроено на подчеркивание логистического превосходства определенного города. Его неоднозначность позволяет организациям, заинтересованным в различных аспектах городской жизни, концентрироваться на многочисленных сферах инноваций (управление, общественная безопасность, транспорт) и улучшения (здоровье и благосостояние, экологическое развитие, качество жизни) [6, 7]. Учредителями данного концепта определяется, что «смарт-урбанизм – это независимая, бесплатная инициатива, направленная на исследования и развитие новой теории и практики в планировании, дизайне и реализации жизнеспособных городов, районов». Вместе с тем эта технология критикуется рядом ученых как таковая, которую трудно определить, и как бытие, которое нельзя увидеть невооруженным глазом.

Руководящие органы, вроде Европейской комиссии, называют умными города, где информационные и компьютерные технологии помогают эффективнее и удобнее обслуживать жителей и предприятия. Департамент транспорта США описывает умные города как урбанистические формы, в которых технологии способствуют мобильности людей и товаров. Разработчики технологий отмечают, что в умных городах задействованы цифровые инструменты,

которые трансформируют их системы жизнедеятельности, оптимизируют использование доступных ресурсов и улучшают качество жизни [8].

Географы Ола Седерстром, Тиль Пааше и Франсиско Клаузер провели глубинный анализ компании IBM Smarter Cities и заметили, что эта неоднозначность самого понятия «умный город» помогает корпорациям калибровать его под собственные определения и параметры «разумности». Эти авторы отстаивают мнение, будто для компаний вроде IBM сами технологии важнее результатов и последствий их использования. Компания IBM считала города и урбанистические технологии потенциально прибыльными рынками, позиционируя при этом свои продукты как «обязательные проходные точки», а корпорацию – как неперемногого партнера в планировании и развитии умных городов. Из всего приведенного можно сделать вывод, что умные города куда чаще рекламируют, чем анализируют.

Принципы смарт-урбанизма. Воплощение в реальность модели умного города сопряжено с соблюдением ключевых принципов, которые заключаются в следующем [9, 10]:

- *Smart Environment* или интеллектуальная окружающая среда: данный принцип подразумевает мониторинг таких параметров, как состояние окружающей природной среды, производственных систем в сфере энергии, термомодернизация зданий и сооружений, расширение так называемых зеленых зон в городе, развитие современных инженерных систем (водоснабжение, канализация и т. д.);

- *Smart Living* или разумный образ жизни: данный принцип подразумевает повышение уровня и качества жизнедеятельности жителей населенного пункта посредством совершенствования инфраструктуры, которое заключается в расширении предложений культурной, образовательной и здравоохранительной систем города, повышении уровня безопасности города и др.;

- *Smart Economy* или умная экономика: данный принцип подразумевает повышение конкурентоспособности и совершенствование интеллектуальной экономики города, это возможно на основе развития бизнеса, формирования центров коворкинга, создания инфраструктуры распространения информации в сфере экономики;

- *Smart Government* или интеллектуальное управление: такое управление означает как улучшение операционных процессов государственных и местных органов власти, так и фактическое участие горожан в принятии решений на уровне города;

- *Smart Mobility* или интеллектуальная мобильность: данный принцип сопряжен со сферой транспорта в вопросах использования ИКТ, повышения доступности к качественным услугам инфраструктуры города, расширения зоны покрытия беспроводной сетью Wi-Fi;

- *Smart People* или умные работники: данный принцип подразумевает формирование квалифицированных рабочих ресурсов посредством повышения доступности обучения, непрерывного образования (в данном случае город в качестве центра обмена опытом и знаниями), развитие библиотек, повышение доступности интернета и т. д.

Суть формирования модели «умный город» взаимосвязана с важностью и необходимостью обеспечения высокого уровня и качества жизни людей на ближайшую перспективу, благодаря использованию современных технологий, в первую очередь направленных на безопасность и экологичность. Внедрение концепции умного города в городскую среду, подразумевает преобразования во всех сферах жизнедеятельности – коммунальные услуги, транспортная инфраструктура, энергетика, торговля и др.

Пример и реализация идеи смарт-урбанизма. Часто умный город определяется через его цели, а интеллектуальный город определяется как более эффективный, устойчивый, справедливый и пригодный для жизни. Цель модели умного города – найти подходящие решения для управления этой проблемой, в частности, путем устранения негативных последствий глобальной урбанизации и повышения качества жизни городского населения.

Передовой опыт демонстрирует Сингапур, являющийся одним из мировых финансовых центров не один год. Развитие Сингапура происходит согласно общенациональной стратегии Singapore Smart Nation. Основными направлениями в развитии городов Сингапура являются развитие:

- цифрового общества;
- цифрового правительства;
- цифровой экономики.

Указанные направления являются ключевыми для общенациональной стратегии Singapore Smart Nation. Премьер-министром Сингапура Ли Сянь Лунг была запущена амбициозная программа «Умная нация», которая, по идее разработчиков, «перенесет город, его жителей и правительство в цифровую эпоху», включая в себя массу направлений и инициатив, стимулирующих развитие собственного IT-сектора в стране. Одно из направлений реализуется с помощью установки огромного количества датчиков по всей территории страны. Так с помощью датчиков контролируются почти все сферы жизнедеятельности города. Датчики поглощают данные и обеспечивают их перераспределение за пользователями. Эффективное осуществление управленческой деятельности управляющими структурами также достигается благодаря датчикам по всему городу, т. к. поступающие данные контролируются программой Virtual Singapore. Данная программа позволяет находить наиболее оптимальные способы управления городом. Подобные инновационные системы (например, добровольное использование в учреждениях для пожилых людей и инвалидов датчиков движения, информирующих близких родственников о длительном нахождении в состоянии покоя лица, находящегося в указанном учреждении) качественно отличаются от более типичных городских инициатив, таких как:

- мониторинг парковочных мест;
- дорожное и городское освещение в целом;
- утилизация отходов.

Реализация различных проектов, которые связаны со смарт-урбанизмом, осуществляется в рамках системного и комплексного проекта Future Cities Catapult в Великобритании. В рамках данного проекта осуществляется кооперация как между уровнем, связанным с развитием промышленности, руководством городов

и правительствами, так и с научными кругами. Целью Future Cities Catapult является определение, создание, тестирование и продажа товаров и услуг для городов. За счет создания смарт-технологий предоставляется возможность для проверки идей и концепций перед тем, как они будут воплощены в реальном мире. Future Cities Catapult является общественной частно финансируемой некоммерческой организацией. Воплощенными и реализованными проектами, внедренными данной организацией, которые соответствуют принципам смарт-урбанизма, являются такие институты, как Bristol Data Dome и Центр операций в Глазго.

Bristol Data Dome – это первый в Великобритании полнокупольный планетарий, адаптированный для презентации медиаданных. Как часть проекта Bristol is Open купол предназначен для визуализации сложных экспериментов, создания интерактивных сред виртуальной реальности и возможности выражения своей уникальной точки зрения присутствующим. Подобные проекты направлены на использование разнообразного контента как рабочей среды и способности демонстрации их потенциала. Модернизация планетария была осуществлена в рамках программы Gigabit Bristol и инициативы Bristol is Open, а также городского совета, которые финансировали проект. Общая миссия состояла в привлечении общественности, как производителей, так и потребителей контента визуализации данных, к пониманию важности открытых данных и их использованию в формировании умных городов.

Для достижения идеи смарт-урбанизма интеллектуальные городские проекты должны рассматриваться на трех уровнях: *умные города, умные здания и умное сообщество*.

Умные города в XXI в. – это катализатор экономического и социального развития, т. к. технологии, применяемые при внедрении данной модели в городскую среду, решают имеющиеся проблемы и позволяют трансформировать систему управления, это в итоге способствует формированию условий развития индивидов в частности. Внедрение модели «умный город» позволяет повысить гудвилл города, повышает его привлекательность с точки зрения инвесторов, рационализирует расходование ресурсов всех видов, дает «зеленый свет» для входа новых отраслей хозяйствования, что становится основными факторами повышения уровня жизни человека. Можно резюмировать, что умный город вбирает в себя абсолютно все сферы жизнедеятельности людей и их взаимодействие с внешней средой [11].

Цифровое правительство включает в себя использование информации и данных, вычислений и связей для преобразования способов обслуживания населения и бизнес-единиц, оно позволяет государственным чиновникам использовать собственные профессиональные способности и навыки.

Функциональным, оптимальным умным городом является система, производящая данные, которые, если они интегрированы на детальном уровне и анализируются, позволяют оптимизировать основные функции города и ресурсы, такие как энергия, транспорт, здравоохранение, инфраструктура и безопасность. Если все сделано правильно, интеграция данных с интеллектуальных светофоров может оптимизировать модели движения, учитывая такие факторы, как погода, объем и скорость автомобиля, расписание автобусов, данные об авариях и многое другое. Без использования широкоугольных доступных

данных города могут пропустить очевидные улучшения, которые практически невидимы. Если системы не объединены, то и данные не будут объединены на детальном уровне [12, 13]. Именно *интеграция данных* является залогом обеспечения попыток города стать умным городом. Для достижения этого руководители городов должны планировать заранее то, как они хотят, чтобы их данные интегрировались и обрабатывались.

Британские ученые провели подсчеты, где отметили, что технологии умного города экономят время граждан в среднем около 125 ч в год. Ученые утверждают, что достичь такого эффекта можно, только если сочетать четыре главных компонента: безопасность, здоровье, транспорт и механизм предоставления качественных услуг. Таким образом, ключевая цель модели «умный город» заключается в оптимизации функций города, а также в стимулировании экономического роста при одновременном повышении качества жизни собственных граждан, при использовании интеллектуальных технологий, а также анализа информации и данных.

К основным технологиям умного города следует отнести: автоматизацию, машинное обучение и интернетную инфраструктуру. Классическим примером является: умный парковочный прибор, умное управление трафиком, умный общественный транспорт, интеллектуальные транзитные компании, использование велосипедов и велодорожка, энергосбережение и эффективность.

Умные городские инициативы XXI в. в большинстве нацелены на мониторинг состояния окружающей среды, а также решение проблем экологии (загрязнение воздушного пространства, климатические изменения).

Умные здания также являются частью интеллектуального городского проекта. Унаследованную инфраструктуру можно модернизировать, а новые дома, построенные с датчиками, не только обеспечивают управление пространством в реальном времени и общественную безопасность, но и контролируют конструктивное здоровье сооружений и зданий. Установка специальных датчиков на здания и другие сооружения позволяет определить износ, а также сообщить заинтересованным лицам, что требуется проведение ремонтных работ. Граждане имеют возможность содействовать данному процессу посредством уведомления органов управления через специальное приложение для умного города, когда нужны ремонтные работы в зданиях и общественной инфраструктуре (например, ухабы). Датчики могут быть использованы для выявления утечек в инженерных системах – водопроводе и иных трубопроводных сетях, что способствует снижению рисков и повышению эффективности работы государственных служащих.

Умное сообщество (Smart Community) – использование анализа данных и информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) для лучшего понимания потребностей жителей и их привлечения, рост роли сообщества, а также предоставление сообществам возможности принимать больше ответственности за сотрудничество в своей жизненной среде. Жители смогут воспользоваться умными домашними приложениями, разработанными коммерческими компаниями.

Многие страны на основе теорий устойчивого развития и умного города разработали программное обеспечение для своего правительства и населения, благодаря чему население страны может рассчитывать на стабильные инициа-

тивы, такие как программа SMART PUB (информация и обслуживание в общественных местах), программа «Умное освещение», программа SolarNova (предусматривает ускорение развертывания солнечных фотоэлектрических систем), программа «Пневматическая система транспортировки отходов», HDB Smart Hub, программа Smart Estate, Smart Car Parks, технология Smart grid и некоторые технологии разумного планирования, такие как инструмент моделирования сложных систем-инструментов принятия решений, которые помогают планировщикам понять компромиссы, связанные с внедрением новых стабильных функций в городах. Например, инструменты, которые позволяют оценивать эффективность различных инициатив (светодиодное освещение, солнечная энергия, небосвод и вертикальная зелень, сбор дождевой воды, сбор и утилизация пневматических отходов), а также принимать решения о лучшей комбинации для достижения постоянства целей экономически эффективным образом.

Пандемия и смарт-урбанизм

Различные аспекты исследования города и городского пространства с позиций экономической целесообразности различных проектов, освещения особенностей влияния факторов пандемии требовали поиска возможности сначала спрогнозировать их последствия, а потом уже реализовать на практике. Логическим продолжением этой потребности стало внедрение технологий, которые бы позволили выявить виртуальные и потенциальные видения, связанные с пандемией. В соответствии с развитием пандемии возникла практика сочетания такого константного объекта, как город, и в некотором смысле противоположного ему, переменного и текущего, как визуальные медиа.

Надо отметить, что концепция смарт-урбанизма состоит из 6 принципов (интеллектуальной окружающей среды, разумного образа жизни, умной экономики, интеллектуального управления, интеллектуальной мобильности, умных работников), которые позволяют производить большинство работ в разных сферах деятельности города более эффективно и предоставляют больше возможностей делать их дистанционно.

Повторно отметим и подчеркнём, что в условиях пандемии в Сингапуре некоторые лечебные и оздоровительные учреждения работали в дистанционном режиме. Tele-Health – это еще одна современная система, позволяющая пациентам взаимодействовать с врачом дистанционно: обмениваться данными о своём состоянии здоровья, получать консультации своего семейного врача с помощью ПК, планшета и других средств аудио- и видеосвязи.

Как было отмечено выше, эффективная организация и осуществление управленческой деятельности управляющими структурами достигается благодаря датчикам по всему городу, что особенно ценно в условиях пандемии.

Использование ключевого принципа умного города (ИКТ) во время пандемии

Во многих работах умный город рассматривается как муниципалитет, который использует информационные и коммуникационные технологии для повышения оперативной эффективности, обмена информации с общественностью и улучшения качества государственных услуг и благосостояния людей.

В реальности модель «умный город» – это использование современных строительных технологий при воспроизводстве домов, новых материалов, трансформация процессов и методов управления городской инфраструктурой, применение передовых информационных технологий для повышения эффективности местной власти. Ключевыми условиями достижения целей модели «умный город» является определение сфер, требующих осовременивания; обоснование набора инструментов, внедрение которых позволит реализовать поставленные цели; проведение реформирования системы управления развитием города. Первоочередная задача, которую в основном решают, – это повышение уровня информатизации деятельности всех подсистем города [14].

Технологии – основа управления системой сетей, в умном городе они пронизывают почти все аспекты повседневности, направляющие деятельность жителей, помогают собирать отзывы от систем и клиентов и отвечать на них в реальном времени. Сердцем такой трактовки умных городов стала способность мониторить поведение и поступки жителей с помощью вездесущих взаимосвязанных сенсоров, чувствительных предметов и скоростного интернет-соединения, преобразующего действия в данные. Стремление считать городские взаимодействия как данные играет на руку определению умных городов как информационных систем оперативного реагирования. Городские среды и популяции постоянно адаптируются к меняющимся условиям, инкорпорируют новейшие технологии и неустанно разрабатывают нормативы и социальные нормы, которые помогают справляться с проблемами на микро- и макроуровне.

Ф. Капротти размышляет о том, какие именно вызовы возникают благодаря концепту смарт-урбанизма. Отмечается, что открывается немало возможностей для воплощения разумного урбанизма в современном городе, однако они нуждаются в обосновании. Должна инициироваться дискуссия по этому вопросу, ведь поскольку цифровые инфраструктуры становятся все более включены в городскую сферу, изучение важности визуальных выражений умного урбанизма становится ключевым проектом для понимания поворота к конкретным итерациям до цифрового города. Первый момент для размышлений касается двойственного характера смарт-урбанизма как пространства, лишённого окон, и как пространства максимальной визуализации потоков данных. Как видно выше, монады – это сущности, отражающие специфический взгляд на городскую реальность, но при этом не участвующие в общении с ней. Это касается идеи создания смарт-городской диспетчерской, которая будет со своими сотнями экранов и асептических консолей создавать город, что будет измеренным и потенциально регулируемым.

На практике умные города определяют как территории, где цифровые медиа стратегически интегрированы в инфраструктуру и программное обеспечение для сбора, анализа и распространения данных, которые помогают принимать информированные структурные решения о городской среде и видах деятельности.

Умные города работают на основе трех важных аспектов: сбор данных и информации; интеграция и анализ данной информации; оптимальное решение в связи с результатом анализа. Эти процедуры невозможно произвести, если не будет развита основная инфраструктура, а именно «информационно-ком-

муникационные технологии (ИКТ)» [13, 15]. Современные ИКТ позволяют проводить дистанционную проверку состояния жителей города с помощью интернета, что, в свою очередь, делает возможным с высокой эффективностью осуществлять дистанционное обслуживание. Кроме того, ИКТ позволяют в ряде сфер работать и учиться дистанционно, что крайне важно в условиях пандемии, т. к. дают возможность дистанцировать людей друг от друга, предотвратить массовые скопления людей и таким образом избежать заражения. Это все в целом повышает безопасность людей.

Преимущество и недостатки смарт-урбанизма в пандемической ситуации

Преимущества:

- прямой мониторинг масштабов проблемы на разных уровнях в городах;
- эффективная геолокация людей и организаций для их обслуживания;
- контроль состояния жителей и органов, их обслуживающих, посредством ИКТ, дистанционное наблюдение без необходимости реальной встречи в пандемической ситуации;
- рациональное использование ресурсов и контроль контакта жителей и обслуживающих органов;
- сокращение сроков принятия решений по вопросам контроля пандемии.

Недостатки и проблемы:

- конкретность цифровой информации и ее точность зависят от развития инфраструктуры в городе и квалификации кадров, интерпретирующих данную информацию;
- нарушение частной жизни жителей городов;
- эффективность работы ИКТ зависит от обучения кадров.

Выводы

В целом, на основе обобщения данного исследования умного города в пандемическое время можно сделать следующие выводы:

- концепция смарт-урбанизма состоит из 6 принципов (интеллектуальной окружающей среды, разумного образа жизни, умной экономики, интеллектуального управления, интеллектуальной мобильности, умных работников), которые позволяют более эффективно адаптироваться в пандемическое время с помощью ИКТ;
- применение принципов смарт-урбанизма с учетом его реализации должно быть достигнуто на трех важных уровнях: город, здание и сообщество;
- ключевыми условиями достижения целей модели «умный город» является определение сфер, требующих осовременивания; обоснование набора инструментов, внедрение которых позволит реализовать поставленные цели; проведение реформирования системы управления развитием города. Первоочередной задачей, которую в основном решают, является повышение уровня информатизации деятельности всех подсистем города;
- мировой образец и пример реализации идеи смарт-урбанизма часто определяется через его цели, которые нуждаются в доработке для обеспечения

всех сфер деятельности города, в том числе для подготовки и использования во время пандемии;

– основные принципы концепции умного города и развитие его инфраструктуры связывают данную концепцию с решением проблем во время пандемии COVID-19;

– можно определить несколько преимуществ и недостатков использования концепции смарт-урбанизма для устранения проблем и улучшения эффективности данной концепции во время пандемии.

Концепция «Умный город» в период пандемии дает возможность решать как насущные проблемы, так и выявлять стратегические направления развития территории, что положительным образом влияет на все сферы жизни населения, включая сферу здравоохранения.

Заключение

Данный анализ помог определить концепцию «Умный город», ее основные принципы, которые создали фундамент (развитие концепции, принципов и широкое развитие инфраструктуры во всех сферах деятельности города) для борьбы с новыми проблемами в городах, которые даже не были подготовлены для такой масштабной проблемы, как пандемия.

Опыт применения концепции умного города в период пандемии COVID-19 доказал правильность выбора стратегии развития города (в рамках достижения основных целей концепции устойчивого развития), его инфраструктуры и подхода к решению проблем заранее, даже без масштабной подготовки. Есть необходимость более внимательного пересмотра градостроительного законодательства и его принципов с точки зрения подготовленного материала, периодической проверки и практического обучения, формирования инфраструктуры для похожих ситуаций, представляющих риски для жизни населения города и риски для системы здравоохранения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрейчин М.А. и др. COVID-19: эпидемиология, клиника, диагностика, лечение и профилактика // Инфекционные болезни. 2020. № 2. С. 41–55.
2. Добреля Н.В., Бухтиярова Т.А. Проблемы биоэтики в контексте пандемии COVID-19 // Фармакология и лекарственная токсикология. 2020. Т. 14. П 3. С. 159–165.
3. Добрянский Д.О. Часто задаваемые вопросы о влиянии COVID - 19 на материнство и здоровье новорожденных детей // Неонатология, хирургия и перинатальная медицина. 2020. Вып. 10. № 2. С. 12–18.
4. Пуммерер Л., Бём Р., Лиллехольм Л., Винтер К., Зеттлер И., Сассенберг К. Теории заговора и их социальные последствия во время пандемии COVID-19 // Социальная психология и наука о личности. 2022. Вып. 13. № 1. С. 49–59.
5. Дуглас К.М. Теории заговора о COVID-19 // Групповые процессы и межгрупповые отношения. 2021. Вып. 24. № 2. С. 270–275.
6. Шарифи А., Хаварян-Гармсир А.Р. Пандемия COVID-19: влияние на города и основные уроки городского планирования, проектирования и управления // Наука об окружающей среде в целом. 2020. Вып. 749. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720359209> (дата обращения: 30.08.2022).
7. Линков И., Кинан Дж.М. COVID-19: системный риск и устойчивость / под ред. Б.Д. Траппа. Нью-Йорк : Спрингер, 2021. 440 с.

8. *Берайтшафт Б., Шеллер Д.* Как пандемия COVID-19 может повлиять на проектирование, планирование и развитие городов 21 века? // *Городская наука*. 2020. Вып. 4. № 56. С. 1–22.
9. *Шарифи А.* Пандемия COVID-19: уроки устойчивости городов // *В COVID-19: системный риск и устойчивость*. Спрингер : Чам, 2021. С. 285–297.
10. *Лак А., Асл С.С., Махер А.* Устойчивая городская форма к пандемиям: уроки COVID-19 // *Медицинский журнал Исламской Республики Иран*. 2020. Вып. 34. С. 71.
11. *Банай Р.* Пандемия и планирование устойчивых городов и регионов // *Города*. 2020. Вып. 106. С. 102.
12. *Прайм Х., Уэйд М., Браун Д.Т.* Риск и устойчивость семейного благополучия во время пандемии COVID-19 // *Американский психолог*. 2020. Вып. 75. № 5. С. 631.
13. *Тинг Д.С.В., Карин Л., Дзау В., Вонг Т.Ю.* Цифровые технологии и COVID-19 // *Природная медицина*. 2020. Вып. 26. № 4. С. 459–461.
14. *Кумар А., Гунта П.К., Шривастава А.* Обзор современных технологий для борьбы с пандемией COVID-19 // *Диабет и метаболический синдром: клинические исследования и обзоры*. 2020. Вып. 14. № 4. С. 569–573.
15. *Уайтлоу С., Мамас М.А., Тополь Э., Ван Сполл Х.Г.* Применение цифровых технологий в планировании и реагировании на пандемию COVID-19 // *The Lancet Digital Health*. 2020. Вып. 2. № 8. С. 435–440.

REFERENCES

1. *Andreychin M.A., et al.* COVID-19: Epidemiology, clinic, diagnosis, treatment and prevention. *Infectious diseases*. 2020. No. 2. Pp. 41–55.
2. *Dobrelly H.V., Bukhtiarova T.A.* Problems of bioethics in the context of the COVID-19 pandemic. *Pharmacology and Drug Toxicology*. 2020. V. 14. No. 3. Pp. 159–165.
3. *Dobryansky D.O.* Frequently asked questions about the impact of COVID-19 on motherhood and the health of newborn children. *Neonatology, Surgery and Perinatal Medicine*. 2020. V. 10. No. 2. Pp. 12–18.
4. *Pummerer L., Böhm R., Lilleholt L., Winter K., Zettler I., Sassenberg K.* Conspiracy theories and their societal effects during the COVID-19 pandemic. *Social Psychological and Personality Science*. 2022. V. 13. No. 1. Pp. 49–59.
5. *Douglas K.M.* COVID-19 conspiracy theories. *Group Processes & Intergroup Relations*. 2021. V. 24. No. 2. Pp. 270–275.
6. *Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R.* The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management. *Science of the Total Environment*. 2020. V. 749. Available: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720359209 (accessed August 30, 2022).
7. *Linkov I., Keenan J.M., Trump B.D. (Eds.).* COVID-19: Systemic risk and resilience. New York: Springer, 2021. 440 p.
8. *Bereitschaft B., Scheller D.* How might the COVID-19 pandemic affect 21st century urban design, planning, and development? *Urban Science*. 2020. V. 4. No. 4. Pp. 1–22.
9. *Sharifi A.* The COVID-19 pandemic: Lessons for urban resilience. In *COVID-19: Systemic risk and resilience*. Springer, Cham, 2021. Pp. 285–297.
10. *Lak A., Asl S.S., Maher A.* Resilient urban form to pandemics: Lessons from COVID-19. *Medical Journal of the Islamic Republic of Iran*. 2020. V. 34. P. 71.
11. *Banai R.* Pandemic and the planning of resilient cities and regions. *Cities*. 2020. V. 106. P. 102.
12. *Prime H., Wade M., Browne D.T.* Risk and resilience in family well-being during the COVID-19 pandemic. *American Psychologist*. 2020. V. 75. No. 5. P. 631.
13. *Ting D.S.W., Carin L., Dzau V., Wong T.Y.* Digital technology and COVID-19. *Nature Medicine*. 2020. V. 26. No. 4. Pp. 459–461.
14. *Kumar A., Gupta P.K., Srivastava A.* A review of modern technologies for tackling COVID-19 pandemic. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*. 2020. V. 14. No. 4. Pp. 569–573.
15. *Whitelaw S., Mamas M.A., Topol E., Van Spall H.G.* Applications of digital technology in COVID-19 pandemic planning and response. *The Lancet Digital Health*. 2020. V. 2. No. 8. Pp. 435–440.

Сведения об авторе

Каширипур Мохаммад Махди, канд. архитектуры, доцент, Белорусский национальный технический университет, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 150, mkashiripour@gmail.com

Author Details

Mohammad M. Kashiripoor, PhD, A/Professor, Belarusian National Technical University, 150, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus, mkashiripour@gmail.com

УДК 712.00

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-38-47

*Г.И. АЛЕКСАНДРОВА, Д.В. КАРЕЛИН,
Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА СРЕДОВОГО ПРОСТРАНСТВА В АСПЕКТЕ ИНЖЕНЕРНОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА

Аннотация. Благоустройство территории является важным критерием при оценке уровня качества жизни населения, т. к. именно оно создает условия благоприятной жизненной среды. Поэтому качество средового пространства с точки зрения благоустройства является актуальной проблемой.

Цель работы: выявить параметры качества инженерного благоустройства территории застройки.

Задачи: определить основные параметры благоустройства, теоретические аспекты благоустройства территории.

Новизна исследования заключается в выявлении параметров комфортной среды в аспекте благоустройства.

Использованы такие методы, как терминологический и семантический анализ, теоретический сравнительный анализ.

Благоустройство территории играет важную роль при создании средового пространства, качество среды характеризуется всеми составляющими благоустройства в совокупности – это визуальное восприятие, долговечность элементов, безопасность, наличие в среде жизненно необходимых объектов с учетом потребности граждан. На качество среды влияют пространственные микропараметры, а также параметры инженерного обеспечения.

Ключевые слова: качество средового пространства, благоустройство, составляющие благоустройства, инженерное обеспечение, пространственные микропараметры благоустройства

Для цитирования: Александрова Г.И., Карелин Д.В. Параметры качества средового пространства в аспекте инженерного благоустройства // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 38–47.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-38-47

*G.I. ALEKSANDROVA, D.V. KARELIN,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*

QUALITY PARAMETERS OF ENVIRONMENTAL SPACE IN ENGINEERING REDEVELOPMENT

Abstract. Purpose: Parameter identification of the quality improvement of engineering redevelopment; identification of the main parameters of improvement; theoretical aspects of landscaping. **Methodology:** Terminological and semantic analysis; theoretical comparative analysis. **Originality:** Identification of comfortable environment parameters in terms of engineering redevelopment. **Research findings:** The territory improvement is important for creating the environmental space, the quality environment is characterized by the improvement components such as visual perception, durability of elements, safety, presence of vital objects with regard to the needs of citizens. The quality environment is affected by spatial microparameters and engineering support parameters. **Practical implications:** The results can be used for assessing the quality of life, since engineering redevelopment creates conditions for achieving the vital environment.

Keywords: environment, improvement, engineering support, spatial microparameters

For citation: Aleksandrova G.I., Karelin D.V. Parametry kachestva sredovogo prostranstva v aspekte inzhenerenogo blagoustroystva [Quality parameters of environmental space in engineering redevelopment]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 38–47.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-38-47

Введение

В современном мире отмечается снижение качества жизни населения, а также ухудшение экологической обстановки. Качество жизни населения с точки зрения архитектуры и градостроительства характеризуется благоприятными жилищными условиями, доступной средой для маломобильных групп населения, максимальным сохранением и охраной окружающей среды, а также развитой улично-дорожной сетью места расселения. Экологическая обстановка учитывает уровень загрязнения почвенно-растительного покрова, воды, воздуха из-за антропогенного воздействия, а также из-за изменения ландшафта [14].

В совокупности все больше требований предъявляется к обеспечению комфортных условий проживания человека, эти требования повышают актуальность задач благоустройства, в частности благоустройства средового пространства [8, 15].

Основная часть

Благоустройство территории, согласно СП 82.13330.2016 «Благоустройство территории», – это комплекс мероприятий по содержанию территории, а также по проектированию и размещению объектов благоустройства, направленных на обеспечение и повышение комфортности условий проживания граждан, поддержание и улучшение санитарного и эстетического состояния территории. То есть к задачам благоустройства относят: защиту сложившейся среды от загрязнения атмосферного воздуха, обеспечение безопасности, мероприятия по снижению шума, комплекс задач по озеленению территории, также сюда включают не менее важную задачу – формирование удобной среды для маломобильных групп населения (рис. 1).

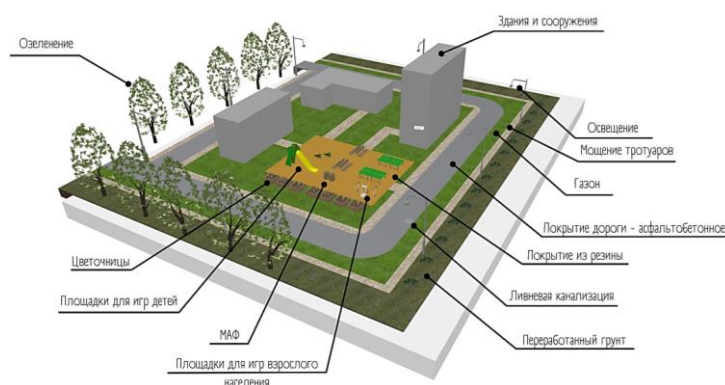


Рис. 1. Модель благоустройства территории

Выявлены следующие параметры комфортного проживания населения в аспекте благоустройства: инженерное обеспечение и пространственные микропараметры.

Пространственные микропараметры. Это локальные параметры благоустройства на уровне квартала, микрорайона, которые находятся в поле зрения человека. К ним относят: геометрические параметры застройки, а именно: ширину и протяженность зданий, минимально-максимальные высотные параметры, способ застройки; плотность застройки по земельным участкам; визуальное наполнение, т. е. динамику фасадов, малые архитектурные формы [7].

Минимально-максимальные высотные параметры зданий – это этажность зданий, которая определяется архитектурной композицией, социальными, демографическими данными, противопожарными, санитарными и другими нормами, предъявляемыми к формированию жилой среды. В жилых зонах размещаются дома разных типов: с девятью и более этажами, называемые многоэтажные; средней этажности – от пяти до восьми этажей; малой этажности – до четырех этажей.

Способ застройки – это размещение зданий и сооружений по отношению к дорогам, улицам, красным линиям. Для жилых территорий характерны основные способы застройки: периметральная, строчная, групповая, свободная, а также комбинированная (рис. 2). Периметральная застройка характеризуется расположением зданий вдоль улиц по периметру территории, при таком способе появляется больше пространства внутри территории застройки, но также выявляются недостатки, такие как недостаточная инсоляция квартир, высокий уровень шума и пыли. В строчной застройке все здания ориентируются параллельно друг другу, в этом случае здания хорошо инсолируются и проветриваются, но по территории застройки относительно мало свободного пространства для размещения разных площадок и зон для отдыха. При групповом способе застройки здания размещаются отдельными группами с образованием внутри группы небольшого пространства, при котором территория и здания хорошо проветриваются, но у зданий, расположенных к магистральным улицам, будет высокий уровень шума и пыли. Свободная застройка подразумевает расположение зданий выразительными композициями с использованием периметральной, строчной или групповой застроек. В такой застройке хорошо решаются вопросы инсоляции, аэрации территории, защиты от пыли и шума. Комбинированная застройка – это сочетание композиций из разных методов, при котором инсоляция, аэрация, защита от шума и пыли будут оптимально соблюдены [1].

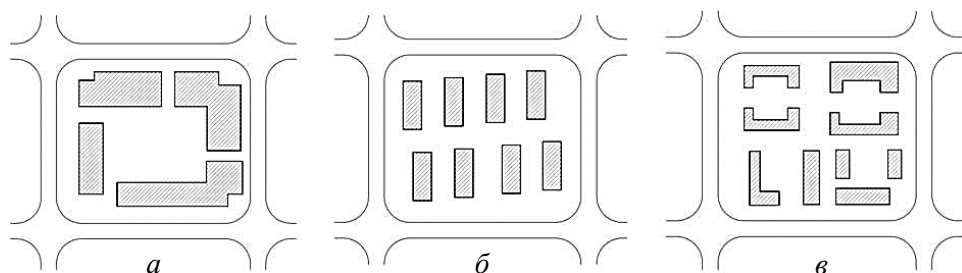


Рис. 2. Способы застройки:

а – периметральная; б – строчная; в – групповая

Плотность застройки территории – это один из основных показателей, используемых в градостроительстве, показывающий интенсивность использования территории, обязывающий наличие свободных участков для снятия нагрузки от застройки. Его следует принимать в соответствии с функциональным зонированием территории, с геометрическими характеристиками территории, с состоянием окружающей среды и других местных условий [2]. Основные показатели плотности застройки: коэффициент (или процент) застройки, т. е. отношение площади, занятой зданиями и сооружениями, к площади территории; коэффициент плотности застройки – отношение площади всех этажей зданий к площади территории.

В своде правил 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» даны рекомендуемые показатели плотностей застройки для разных территориальных зон. Точные показатели приведены в правилах землепользования и застройки (ПЗЗ) отдельных муниципальных образований, утвержденных органами местного самоуправления.

Рассмотрим на примере зон застройки жилыми домами Сибирского федерального округа, в состав которого входят города Новосибирск, Омск, Красноярск, Кемерово и т. д.

В г. Новосибирске, по данным 2022 г., проживает 1621330 чел., а площадь города составляет 502,7 км², плотность населения 3,2 тыс. чел. на 1 км². В ПЗЗ прописаны зоны разной этажности с разными плотностями застройки. Ж-1 – это зона застройки жилыми домами смешанной этажности, в которую входят подзоны: Ж-1.1 – различной плотности застройки; Ж-1.2 – высокой плотности застройки; Ж-1.3 – повышенной плотности застройки; Ж-1.4 – средней плотности застройки; Ж-1.5 – пониженной плотности застройки; Ж-1.6 – низкой плотности застройки. Ж-2 – это зона застройки малоэтажными жилыми домами, Ж-4 – многоэтажными жилыми домами, Ж-5 – повышенной этажности, Ж-6 – индивидуальными жилыми домами. Для зоны Ж-3 данные по плотности застройки не установлены. Для зон Ж-2, Ж-6 не установлены минимальные проценты и коэффициенты плотности застройки.

Проанализированные данные по максимальному коэффициенту плотности застройки, по минимально-максимальному проценту застройки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Плотности застройки жилых зон г. Новосибирска

Вид застройки	Максимальный коэффициент плотности застройки				Минимальный процент застройки	Максимальный процент застройки
Ж-1						
	Ж-1.1 Ж-1.2 Ж-1.3	Ж-1.4	Ж-1.5	Ж-1.6		
Многоквартирные среднеэтажные дома	2,5	2,3	2,0	1,6	10	50
Многоквартирные многоэтажные дома	2,5	2,3	2,0	1,6	10	40

Окончание табл. 1

Вид застройки	Максимальный коэффициент плотности застройки				Минимальный процент застройки	Максимальный процент застройки
Малоэтажные многоквартирные дома					20	40
Индивидуальные жилые дома					10	30
Гостиницы					10	70
Ж-2						
Малоэтажные многоквартирные дома						40
Ж-4						
Многokвартирные многоэтажные дома	2,5				15	30
Ж-5						
Многokвартирные многоэтажные дома	2,5				10	25
Ж-6						
Индивидуальные жилые дома, садовые дома, жилые дома						30

По данным 2021 г., в г. Омске проживает 1139897 чел., площадь территории города 577,9 км², плотность населения 1,97 тыс. чел. на 1 км². По ПЗЗ прописаны следующие виды жилых зон: индивидуальной жилой застройки – Ж-1; малоэтажной жилой застройки – Ж-2; жилой застройки средней этажности – Ж-3; жилой застройки высокой этажности – Ж-4. Для зон Ж-1, Ж-2 численные значения плотностей застройки не установлены. Для зон Ж-3, Ж-4 не установлены коэффициенты застройки. Данные по коэффициенту плотности застройки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Плотности застройки жилых зон г. Омска

Вид застройки	Максимальный коэффициент плотности застройки
Ж-3	
Среднеэтажная жилая застройка Общеселения	2,4
Ж-4	
Малоэтажная многоквартирная жилая застройка	1,7
Среднеэтажная жилая застройка	2,4
Многоэтажная жилая застройка	2,5

Площадь территории г. Красноярска 379,5 км², по данным 2022 г., там проживает 1103023 чел., плотность населения 2,9 тыс. чел. на 1 км². В ПЗЗ приняты следующие жилые зоны: зона застройки индивидуальными домами – Ж-1; среднеэтажными многоквартирными, блокированными домами – Ж-2; среднеэтажными домами – Ж-3, подзоны застройки среднеэтажными домами – Ж-3.1; многоэтажными домами – Ж-4, подзоны застройки многоэтажными домами – Ж-4. В данном документе прописаны максимальные проценты и коэффициенты плотности застройки, которые приведены в табл. 3.

Таблица 3

Плотности застройки жилых зон г. Красноярска

Зоны застройки	Максимальный процент застройки	Коэффициент плотности застройки
Ж-1	40	
Ж-2	40	1
Ж-3	40	1,5
Ж-3.1	60	1,9
Ж-4	40	1,5
Ж-4.1	60	1,9

В г. Кемерово, площадью 294,8 км², в 2022 г. проживает 552 546 чел., плотность застройки 1,87 тыс. чел. на 1 км². В ПЗЗ установлены следующие виды жилых зон: Ж-1 – зона застройки многоэтажными многоквартирными домами; Ж-2 – среднеэтажными многоквартирными домами; Ж-3 – индивидуальными жилыми домами; Ж-4 – малоэтажными жилыми домами блокированной застройки и многоквартирными домами. Здесь приведены численные показатели по максимальному проценту застройки. Данные внесены в табл. 4.

Таблица 4

Плотности застройки г. Кемерово

Вид застройки	Максимальный процент застройки
Ж-1	
Многоэтажная жилая застройка	35
Общежития	40
Гостиницы	80
Ж-2	
Среднеэтажная жилая застройка	40
Ж-3	
Индивидуальное жилищное строительство	80
Малоэтажная многоквартирная жилая застройка	40
Ж-4	
Малоэтажная многоквартирная жилая застройка	40
Блокированная жилая застройка	60

Таким образом, в городах Сибирского федерального округа с резко континентальным климатом плотность застройки различна. Прежде всего, это связано с плотностью населения городов, с их историей расселения как фактора особенностей застройки территории.

Динамика фасадов – это ритм элементов здания, его формы, структуры, облика, то, что формирует главный акцент на здание, его запоминаемость. Такое визуальное восприятие исходит из внешних свойств объекта, обеспеченных определенными композиционными приемами [9]. К внешним свойствам объекта относятся форма, размеры, цветовое решение, количество элементов фасада, таких как окна, балконы, лоджии, двери и другие выступающие элементы. При использовании различных свойств все вышеперечисленные элементы будут по-разному влиять на осознание человека [3].

Малые архитектурные формы (МАФ) – это архитектурные сооружения или элементы благоустройства, которые предназначены для организации средового пространства, имеют декоративный характер и собственные функции [4]. По ним выявлена глобальная иерархия: экспозиционные, эксплуатационные и информационные МАФ.

Экспозиционные МАФ – это элементы благоустройства, которые носят только декоративный характер, создают эстетическую составляющую среды: различные скульптуры, арборскульптуры, фонтаны, цветочные модули для посадки разнообразных цветочных растений, декоративные камни.

Эксплуатационные МАФ – это элементы, предназначенные для использования, обеспечивающие удобства территории для обустройства мест отдыха, для разделения пространства. К ним относят: скамейки, урны, фонари, беседки, детские игровые комплексы, спортивные площадки, песочницы, качели, заборы, декоративные ограждения и т. д.

Информационные МАФ – это элементы передачи информации, такие как различные стенды, вывески, афиши для рекламы, объявлений, таблички для нумерации домов.

Инженерное обеспечение. К инженерному обеспечению относят наполнение средового пространства инженерными коммуникациями, озеленение, вертикальную планировку, мощение улиц и дорог, устройство парковочных мест.

К *озеленению* территории относят все виды работ, связанных с растительными насаждениями, которые направлены на улучшение экологической обстановки среды. Они также выполняют функции защиты и безопасности пешеходов, гигиенические, защиты от психологического и оптического воздействий [13]. Это посадка деревьев, кустарников, создание газонов, архитектурных форм, таких как перголы, живые изгороди, цветочницы и цветочные композиции. При посадке и проектировании групп деревьев и кустарников необходимо учитывать паспорт растений, как важнейший фактор отношения растений к условиям среды, к изменению климата, освещения, влажности и т. д., аллелопатию, т. е. взаимодействие между растениями, размеры и формы кроны растения [6, 11].

Также стоит отметить, что к инженерному благоустройству относят *вертикальную планировку*, все работы по перемещению земляных масс, после которых часть из них впоследствии покрывается твердым покрытием – резиновым, асфальтобетонным, тротуарной плиткой или же может стать укрепленным

газоном. Некоторая часть земляных масс остается без покрытия, что тоже является частью инженерного благоустройства [12].

Одной из важных задач инженерного благоустройства территории является *прокладка инженерных коммуникаций*. Это специальное оборудование, оснащающее территорию жизненно необходимыми средствами: освещением улиц и дорог, водоснабжением, канализацией для отвода бытовых, ливневых и снеговых стоков, газопроводами, теплопроводами, электропроводами, сетями для подключения связи и интернета и другими сетями.

Проблема подтопления, замачивания территории, появившихся вследствие снега, дождя и других осадков и природных явлений, в настоящее время является актуальной, т. к. нарушается экосистема земли, а также повреждаются покрытия дорог, тротуаров, газонов, что приводит к уменьшению срока их эксплуатации. Для решения этих проблем прокладывают водосточные трубы. Это ливневые (или дождевые) канализации, которые предназначены для отвода поверхностных вод за пределы района, участка, городских территорий и их очистки от загрязнений и дальнейшей эксплуатации [5].

Таким образом, в чем же проявляется качество средового пространства в аспекте благоустройства? Исходя из совокупности всех вышеперечисленных элементов благоустройства и учитывая сложившиеся условия среды, следует отметить, что качество благоустройства проявляется в долговечности предметного наполнения среды, в визуальной составляющей, в ощущении человеком себя в безопасности и сохранности, реализации пространства с учетом потребностей граждан. Все составляющие в совокупности имеют законченный характер, при отсутствии какой-либо части благоустройства пространство начинает терять свою репрезентативность.

Заключение

В данной статье проведен анализ по выявлению основных параметров благоустройства территорий и выявлены их теоретические аспекты. К параметрам благоустройства относятся: геометрические параметры застройки, способ застройки, плотность застройки, визуальное наполнение, озеленение, вертикальная планировка, наличие инженерных коммуникаций, устройство покрытий дорог и тротуаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Провалова Е.В., Шайдуллина Г.А. Приемы планировки и застройки территории при формировании многофункциональных комплексов города Ульяновска // Никоновские чтения. 2019. № 24. С. 352–354.
2. Чебакова А.А., Карелин Д.В. Влияние параметров плотности застройки на комплексное развитие городских территорий // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2021. Т. 24. № 1/2 (79/80). С. 69–75.
3. Бабич В.Н., Кремлев А.Г. Динамические качества инновационных фасадов // Архитектон: Известия вузов. 2019. № 22 (66). URL: http://archvuz.ru/2019_2/1/ (дата обращения: 29.04.2022).
4. Корвякова С.М. Типология малых архитектурных форм (МАФ) и их классификация, учитывающая предназначение в пространстве и функциональные особенности // Наука России: Цели и задачи : сб. научных трудов 16 Международной научной конференции. Воронеж : НИЦ «Л-Журнал», 2019. С. 94–98.

5. *Мамина Д.Х., Рыков С.В.* Экологическая безопасность дворовых территорий и ливневая канализация // Новая наука: стратегии и векторы развития. 2016. № 3-2 (70). С. 13–15.
6. *Гладов А.В.* Озеленение как фактор повышения благоустройства города (на примере городского округа Самары) // Вестник Самарского государственного университета. 2015. № 2 (124). С. 217–214.
7. *Шимко В.Т.* Архитектурно-дизайнерское проектирование городской среды. Москва : Архитектура-С, 2006. 382 с.
8. *Aksenova V.V., Frolova E.V.* Improvement of the urban environment of the megapolis: the main trends and estimates of the population // Contemporary problems of social work. 2019. V. 5. № 4 (20). P. 49–58.
9. *Коротич А.В.* Фасадная фактура в художественном облике современной высотной архитектуры // Архитектон: Известия вузов. 2018. № 4 (64). URL: http://archvuz.ru/2018_4/2 (дата обращения: 29.04.2022).
10. *Китова К.Н., Комиссаров А.В.* Инженерное благоустройство городских территорий. Основные виды мероприятий // Аллея науки. 2019. Т. 1. № 10 (37). С. 94–98.
11. *Stapleton T.* Just How Powerful Are Pedestrianised Streets? // The Voice of Landscape architecture. URL: <https://land8.com/just-how-powerful-are-pedestrianised-streets/> (дата обращения: 08.05.2022).
12. *Владимиров В.В., Давидяц Г.Н. и др.* Инженерная подготовка и благоустройство городских территорий. Москва : Архитектура-С, 2014. 238 с.
13. *Egerer M.H., Threlfall C.G., Kendal D.* Temperature variability Influences urban garden plant richness and gardener water use behavior, but not planting decisions (Article) // Science of the Total Environment. 2019. 1 January. V. 646. P. 111–120.
14. *Karakova T.* A Approaches to developing the design code as part of the modern city improvement standard // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 106. P. 1–6.
15. *Денисов В.Н.* Благоустройство территории муниципального образования. Санкт-Петербург, 2017. 93 с.

REFERENCES

1. *Provalova E.V., Shaidullina G.A.* Priemy planirovki i zastroyki territorii pri formirovanii mnogo-funktional'nykh kompleksov goroda Ul'yanovska [Planning and building development in multifunctional urban complexes in Ulyanovsk]. *Nikonovskie chteniya*. 2019. No. 24. Pp. 352–354. (rus)
2. *Chebakova A.A., Karelin D.V.* Vliyanie parametrov plotnosti zastroyki na kompleksnoe razvitiye gorodskikh territorij [Influence of building density parameters on the integrated development of urban areas]. *Trudy Novosibirskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2021. V. 24. No. 1/2 (79/80). Pp. 69–75. (rus)
3. *Babich V.N., Kremlev A.G.* Dinamicheskie kachestva innovatsionnykh fasadov [Dynamic qualities of innovative facades]. *Arhitekton: izvestiya vuzov*. 2019. No. 22 (66). Available: http://archvuz.ru/2019_2/1/ (rus)
4. *Korvyakova S.M.* Tipologiya mal'nykh arkhitekturnykh form (MAF) i ikh klassifikatsiya, uchityvayushchaya prednaznachenie v prostranstve i funktsional'nye osobennosti [Typology and classification of small architectural forms with regard to space and functional properties]. In: *Nauka Rossii: Tseli i zadachi*. Voronezh, 2019. Pp. 94–98. (rus)
5. *Мамина Д.Х., Рыков С.В.* Экологическая безопасность дворовых территорий и ливневая канализация [Environmental safety of courtyards and storm drain]. *Novaya nauka: Strategii i vektory razvitiya*. 2016. No. 3-2 (70). Pp. 13–15. (rus)
6. *Gladov A.V.* Ozeleneniye kak faktor povysheniya blagoustrojstva goroda (na primere gorodskogo okruga Samary) [Landscaping as a factor of city improvement (Samara)]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. No. 2 (124). Pp. 217–214. (rus)
7. *Shimko V.T.* Arkhitekturno-dizajnerskoe proektirovaniye gorodskoy sredy [Architecture and design of urban environment]. Moscow: Arkhitektura-S, 2006. 382 p. (rus)
8. *Aksenova V.V., Frolova E.V.* Improvement of the urban environment of the megapolis: The main trends and estimates of the population. *Contemporary Problems of Social Work*. 2019. V. 5. No. 4 (20). Pp. 49–58.

9. Korotich A.V. Fasadnaya faktura v khudozhestvennom oblike sovremennoj vysotnoj arkhitektury [Facades in modern high-rise architecture]. *Arkhitkton: Izvestiya vuzov*. 2018. No. 4 (64). Available: http://archvuz.ru/2018_4/2 (rus)
10. Kitova K.N., Komissarov A.V. Inzhenernoe blagoustrojstvo gorodskikh territorij. Osnovnye vidy meropriyatij [Engineering redevelopment of urban areas. Main types of events]. *Alleya nauki*. 2019. V. 1. No. 10 (37). Pp. 94–98. (rus)
11. Stapleton T. Just how powerful are pedestrianised streets? The voice of landscape architecture. Available: <https://land8.com/just-how-powerful-are-pedestrianised-streets/>
12. Vladimirov V.V., Davidiyanc G.N., et al. Inzhenernaya podgotovka i blagoustrojstvo gorodskikh territorij [Engineering redevelopment of urban areas]. Moscow: Arkhitektura-S, 2014. 238 p. (rus)
13. Egerer M.H., Threlfall C.G., Kendal D. Temperature variability Influences urban garden plant richness and gardener water use behavior, but not planting decisions. *Science of the Total Environment*. 2019. V. 646. No. 1. Pp. 111–120.
14. Karakova T.A. Approaches to developing the design code as part of the modern city improvement standard. *MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 106. Pp. 1–6.
15. Denisov V.N. Blagoustrojstvo territorii municipal'nogo obrazovaniya [Municipal territory improvement]. Saint-Petersburg, 2017. 93 p. (rus)

Сведения об авторах

Александрова Генриетта Игоревна, студентка магистратуры, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, genriettaa1@gmail.com

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

Authors Details

Genrietta I. Aleksandrova, Graduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, genriettaa1@gmail.com

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

УДК 711.581.03

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-48-61

*Е.И. ГУРЬЕВА, В.А. ВОРОБЬЕВ,
Воронежский государственный технический университет*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ СПОРТИВНЫХ ЗОН В ЛОКАЛЬНОЙ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

Аннотация. Рассмотрены вопросы развития общественных спортивных зон в локальной градостроительной среде. Задача исследований направлена на выявление и обоснование предпосылок для всестороннего распространения и доступности на всех градостроительных уровнях сети спортивно-оздоровительного характера при формировании единой архитектурно-пространственной среды.

Излагаются принципы, формирующие особенности спортивных сооружений. Проанализировано обоснование их построения в локальной градостроительной среде: виды, особенности и характеристики. Описывается анализ характера коммуникативных связей и их роль в организации функциональных пространств в локальной градостроительной среде. Приведен алгоритм построения спортивных зон в локальной градостроительной среде как средства социальной интеграции в активную культуру.

В процессе исследования и разработки модели тематического развития были учтены современные требования для комфортного пребывания рекреантов, основанные на принципах устойчивости, адаптивности, уникальности с точки зрения целостных фрагментов городской среды, что позволит привлечь внимание горожан к спорту и обеспечит оздоровление социальной среды.

Ключевые слова: градостроительство, локальная городская среда, спортивные зоны, типология, коммуникативная связь, дворовые территории, парк, бульвар

Для цитирования: Гурьева Е.И., Воробьев В.А. Современные тенденции развития общественных спортивных зон в локальной градостроительной среде // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 48–61.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-48-61

*E.I. GURIEVA, V.A. VOROBYOV,
Voronezh State Technical University*

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PUBLIC SPORTS AREAS IN URBAN ENVIRONMENT

Abstract. Purpose: Identification and substantiation of prerequisites for the comprehensive sports dissemination and accessibility at all urban planning levels and recreation network in the architectural and spatial environment. **Methodology:** Development of the principles of sports facilities. The analysis of types, features and characteristics of the urban environment construction; the nature of communicative connections and their role in the organization of public sports areas. The algorithm is proposed for the construction of sports areas in the urban environment as a means of social integration into the culture. **Originality:** Modern requirements for a comfortable stay of recreants are considered using the principles of sustainability, adaptability, uniqueness. **Practical implications:** The proposed urban environment will attract the attention of citizens to sports and improve the social environment.

Keywords: urban planning, urban environment, sports area, typology, communication, yard territories, park, boulevard

For citation: Gur'eva E.I., Vorob'ev V.A. Sovremennye tendencii razvitiia obshchestvennykh sportivnykh zon v lokal'noj gradostroitel'noj srede [Current trends in the development of public sports areas in urban environment]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 48–61.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-48-61

Введение

Городская среда есть многогранный структурный механизм, имеющий различные формы, среды и парадигмы развития, а также потенциал, проблемы, ценности и многое другое [1]. *Одной из наиболее актуальных проблем является цельность восприятия градостроительного каркаса.* Она обусловлена многообразием связей внутреннего и внешнего порядка. Различные функционально-смысловые, образно-пластические особенности всегда заставляют сравнивать и уравновешивать городскую среду, делая ее повсеместно доступной и развитой [2].

В отношении спортивной отрасли в городской среде, как и в иной типологии, преобладают собственные закономерности и алгоритмы устройства и развития. Потенциалы рассмотрения тех или иных территорий города, как правило, зависят от их ценностного эквивалента во всех отношениях [3]. В настоящее время особую актуальность это приобретает в экономике, культуре, мировоззрении, транспорте, коммуникациях, художественных особенностях и многом другом. Фрагментарность городской среды обуславливается не только разнообразием систем и форм развития, но и стратегиями управления и контроля, планирования и развития отдельных концепций для соединения полноценного градоформирующего каркаса с учетом уникальности каждого отдельного участка города [4, 5].

Одной из основных особенностей является спортивная инфраструктура – в данной связи интегрируется в пространство также по уровням иерархии, развивая в среде крупные и локальные формы спортивно-оздоровительного характера. В зависимости от особенностей градостроительного планирования в среде актуализируются те или иные функции социального обеспечения [6]. Данная зависимость имеет наиболее явные черты в характере развития крупных объектов городской инфраструктуры, в которые входят и достаточно большие многофункциональные спортивные комплексы, расширяющие глобальный потенциал сезонного пользования спортивного направления [7, 8].

Локальная градостроительная среда (ЛГС), в свою очередь, формирует диапазон открытых общественных доступных площадок, раскрывающих местные культурные формы и традиции развития и взаимодействия общества. Как известно, спортивный сегмент культуры имеет национальные патриотические корни, а значит, всестороннее распространение и доступность на всех градостроительных уровнях сети спортивно-оздоровительного характера ложатся в приоритеты государственной политики. Начало таких действий стартует с трансформации локальных пространств социального значения: это и дворовые территории, и скверы, небольшие парки, отдельно стоящие площадки и благоустройство

прилегающих территорий каких-либо центров и структур госучреждений. Все это составляет перспективные полигоны для развития спортивной инфраструктуры общедоступного характера. Целью исследования являлось изучение локальной градостроительной среды по вопросам коммуникативных связей, их роли в организации пространств, значимости тех или иных функций.

1. Теоретическое обоснование построения ЛГС: виды, особенности и характеристики

Городская среда – это все то, что создает образ города и принципиально влияет на образ и стиль жизни его обитателей [1, 9, 10]. Разумеется, в составную структуру такого содержания входят: объекты природы, недвижимости, инженерного обеспечения, безопасности, потребительского рынка, социальных услуг и т. д. Все это формирует устойчивый каркас взаимодействия, обеспечивая население необходимым спектром функций и удовлетворяя потребности на локальном и глобальном уровнях, в зависимости от форм взаимодействия человека со средой (таблица).

Существенной особенностью являются локальные компоненты городской среды [11–14]. Они имеют разнообразную функционально-типологическую, образно-пластическую, территориальную и культурную окраску, однако именно это и делает их единицами целостного взаимодействия и выражения всестороннего облика города. В срезе функционального сегмента они представлены дворовыми территориями, парками, скверами, прилегающими территориями различных социальных учреждений, учреждений культуры и т. д., все среды, входящие в контекст социальной доступности и трансформации, за исключением частной собственности. Для спортивно-оздоровительного направления очень важна популяризация в социальной среде на широком диапазоне, поэтому чем насыщеннее социальный коэффициент, тем более пространство заинтересовано в его развитии и коммуникациях [15–17].

Таким образом, спорт в локальных средах выступает звеном коммуникаций и развития человека с начальных этапов. ЛГС позволяют укрепить роль в отношениях общества посредством различных функциональных направлений и устройства внутреннего зонирования. Спортивно-оздоровительный блок выступает здесь в качестве формы общего развития человека в зоне коллективного взаимодействия [18–21].

Именно тут формируется интерес и отношение к культуре, выстраивается баланс местного комфорта и условий для гармоничной жизнедеятельности.

В каждой локальной зоне города преобладает собственный потенциал как социальной, так и внешней активности, что заставляет среду либо развиваться, либо деградировать. Все это прямо влияет на становление новых функциональных взаимодействий и зон, определяемых запросом общества или приобщением его к новым формам культуры. Физическое воспитание в таком случае выступает в качестве досуговой формы времяпрепровождения и ориентирует человека именно на местную сферу коммуникаций, что позволяет развивать именно конкретный фрагмент городской территории. К характеристикам ЛГС можно также отнести их прямую связь с сезонной динамикой, что открывает новые форматы

взаимодействия со средой, трансформируя и изменяя старые, ограничивая порой зону использования и комфорт эксплуатации.

**Принципы, формирующие особенности спортивных сооружений
(автор В.А. Воробьев)**

Особенности территории	Градостроительные проекты	Градостроительные решения	
Удобство, обеспеченность, доступность	Функционально-планировочная организация, зонирование, связи	Уникальность	
Природная среда	Основные сооружения	Сезон (лето, зима, универсальные)	
	Адаптивность	Конструкция (крытые, открытые, приспособленные, отдельно стоящие, встроенные)	
		Объемно-пространственная организация (плоские, объемные)	
		Развитие и распространенность (зависящие и не зависящие от условий местности)	
		Характер использования (специальные, универсальные)	
		Особенность эксплуатации (учебные, тренировочные, демонстрационные)	
⇓			
Целостность			
Прогрессивность	Функциональность	Коммуникативность	Нормативное обеспечение
⇓			
Эстетичность			
Технологичность	Экологичность	Выразительность	Природно-ландшафтные условия

В данной связи спортивная структура наиболее подвержена местному запустению и заставляет человека намеренно менять локации и искать новые форматы взаимодействия с необходимыми функциями. ЛГС формирует целостную универсальную функциональную типологию, она устанавливает общепринятые нормы и собственные требования для организации пространства, унифицируя часть компонентов, делая их тем самым наиболее близкими к человеку и доступными для разных возрастных групп, облегчая и экономику производства. Условия ведения градостроительной политики определяются сегментными подразде-

лениями, которые имеют единую целевую программу по освоению и развитию общественных пространств. Конечно, их деятельность направлена не только на полную унификацию, но и уникальность, никто еще ее не отменял. Архитектурные, художественные особенности, духовные компоненты так же важны не только в контексте рассмотрения широкого диапазона градостроительного каркаса, но и в узких границах, формирующих местную культуру и идентичность, смысловое многообразие и концептуальное восприятие. Именно ЛГС составляет целостную картину образа города, его перспектив на различных рубежах, поэтому отношение к планированию таких территорий должно определять концентрацию динамики местной культуры, развивать ее на уровне баланса экономических возможностей и социально-культурного развития, руководствуясь определенными нормами как функциональности, так и эстетики, безопасности, комфорта и, конечно же, доступности.

2. Анализ характера коммуникативных связей и их роль в организации функциональных пространств в ЛГС

Рассмотрение коммуникаций в данной теме лежит в двух основных плоскостях: это внутреннее функциональное, социальное взаимодействие в локальной среде и взаимодействие непосредственно этих сред для выявления закономерностей развития городской среды в целом. Локальные группы должны обладать определенной самостоятельностью ввиду акцента на доступность. Это формирует активное функциональное наполнение, нуждающееся в грамотной интеграции для наиболее устойчивого формирования социальных отношений, композиционно-художественных и иных связей, ответственных за комфортное восприятие и пользование средовой морфологией.

Спортивная инфраструктура в таком случае выступает одним из важнейших функциональных и композиционных узлов малой территории, собирая вокруг себя различные социальные и возрастные группы. Коммуникативный диалог здесь прослеживается как с самой территорией, так и с конкретным функциональным оборудованием, его возможностями. Детские и спортивные площадки являются притоком местного населения, гостей, туристов (рис. 1). В местах повседневной эксплуатации и постоянного трафика используются свои методы развития инфраструктуры территории, они достаточно линейны и отработаны, а в зонах уникального значения и более широкого использования преобладает более нестандартный подход к решению функциональных и обр-разно-смысловых вопросов.

Наиболее сильные и плотные связи проявляются в местах широкого использования: общественных пространствах, где социальный трафик весьма разнообразен, следовательно, разнообразен характер функционального наполнения ЛГС. Дворовые территории и различные прилегающие участки всевозможных учреждений не могут похвастаться коммуникативной активностью так, как это могут сделать парки и скверы, где люди целенаправленно отдыхают и взаимодействуют с природой, ее активными формами и возможностями, но тут уже вступают в силу иерархия и значение того или иного участка городской среды. Градостроительная целостность формируется связями между ЛГС, а их устойчивость зависит от особенностей внутренних взаимодействий каждой из

отдельно рассматриваемых зон. Здесь очень важна мягкость и последовательность реакций, переходящих из одной ЛГС в другую.

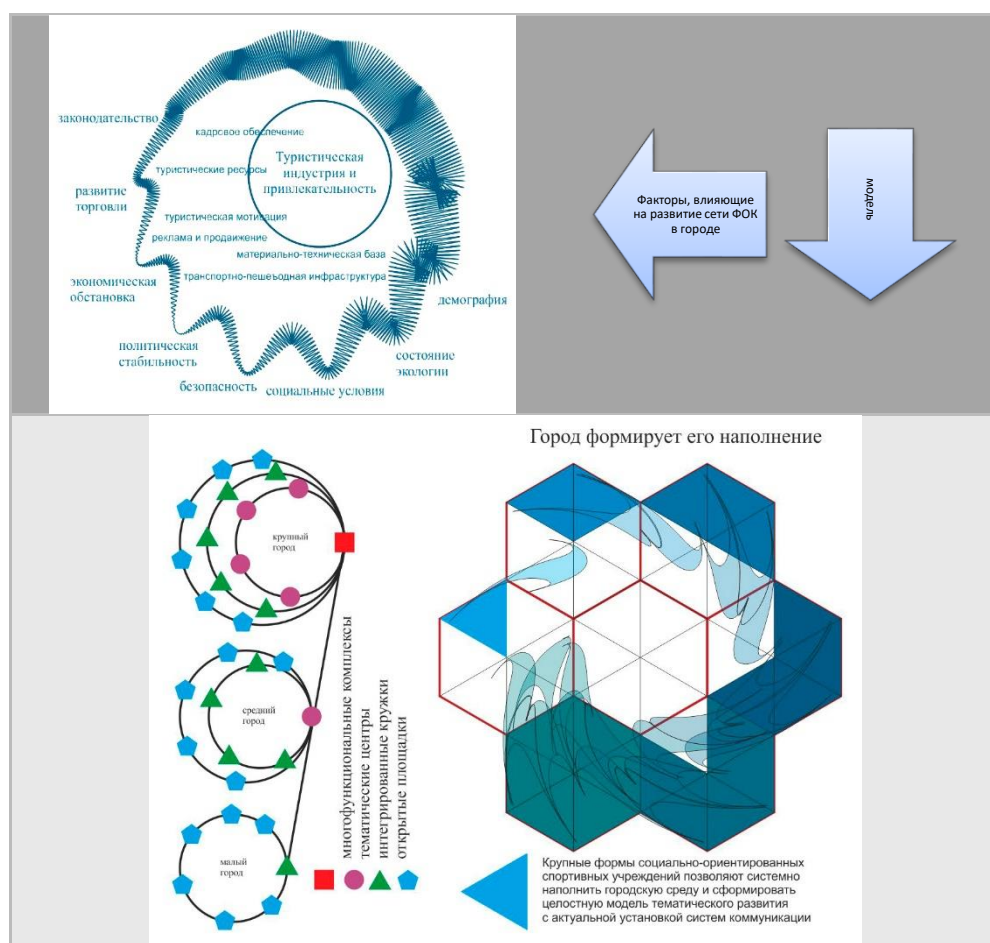


Рис. 1. Модель тематического развития с актуальной установкой систем коммуникации (автор В.А. Воробьев)

В отношении спортивных форм развития, бесспорно, преобладает определенный алгоритм, который и не претендует на роль доминанты и многофункционального комплекса как градоформирующего звена. Местные площадки организуют популяризацию спорта, создавая условия для интереса к здоровому образу жизни и его развитию в жизни человека. Развитие и взаимодействие спортивной среды начинается с установки расположенности населения к тем или иным функциональным потребностям в данной области. Их масштаб может быть различен, но уже наличие спортивного звена в функциональной сети локальной территории стимулирует к смысловым и действенным реакциям и, что еще важно, формирует разнообразие между интеллектуальной деятельностью и физической, что в современной действительности весьма актуально.

В ЛГС преобладают и закрытые профильные залы, школы и центры, обеспечивающие население более комфортными условиями для развития и взаимодействия, они также проявляют больший потенциал среди занятого населения. Непрерывное развитие мира, культуры, технологий и многого другого заставляет человека активно погружаться в спортивную атмосферу и создавать для себя же комфортную среду. Местные учреждения спорта и физической культуры в формате тренажерных залов сегодня определили большой интерес социальной среды к собственной физической форме, установив не только внутренний коммуникационный каркас, но и градостроительные связи и цепочки нарастающей конкурентной активности, что позволяет человеку сегодня задуматься о таком понятии, как сервис и его выбор. Многонаселенность крупных городов наиболее ярко влияет на развитие такой конкуренции, открывая для человека более широкий диапазон возможностей и вариантов выбора. Спортивный интерес в таком случае возрастает на порядок и требует не просто линейного наличия простых форм развития, но и сложных моделей управления собственным телом и здоровьем.

Как же в таком случае ведет себя среда, архитектура и город? Конечно, актуализируется локальная интеграция различных объектов, они вплетаются в существующий типологический контекст и развивают собственные функции, что делает среду в общем более доступной и многофункциональной. Уплотняются компетентностные, функциональные, территориальные, эстетические, композиционные и иные связи, что создает атмосферу больших возможностей и стимулирует интерес человека, исследуя образ его жизни и адаптируя собственные задачи под него.

3. Алгоритм построения спортивных зон в ЛГС как средства социальной интеграции в активную культуру

Спортивные объекты ЛГС сегодня представляют широчайший диапазон направлений, вызывающих у человека последовательный интерес и привычку к такому образу жизни, который окружает его. Создание различных тематических кружков по большей мере вытеснило значение малых открытых спортивных площадок, не адаптированных под сезонные изменения, однако крупные из них, наоборот, направляют на себя внимание и располагают к многофункциональному постоянному использованию. Интегрированные центры спортивной подготовки имеют постоянство в своей специализации и дают человеку конкретную программу развития по тому или иному направлению. Функциональная насыщенность ЛГС сегодня напрямую зависит от пропускных параметров социальной активности, что влияет и на будущий образ архитектурно-градостроительной среды (рис. 2).

Стремление к культуре устанавливает собственную планку философского подхода к данной теме. Трансформация социального уровня через наполнение средовыми особенностями может играть вполне позитивную роль, однако это не всегда работает на благо культурных созидательных изменений, вследствие чего доступность до такого многообразия для менее развитого населения находится в определенных рамках.

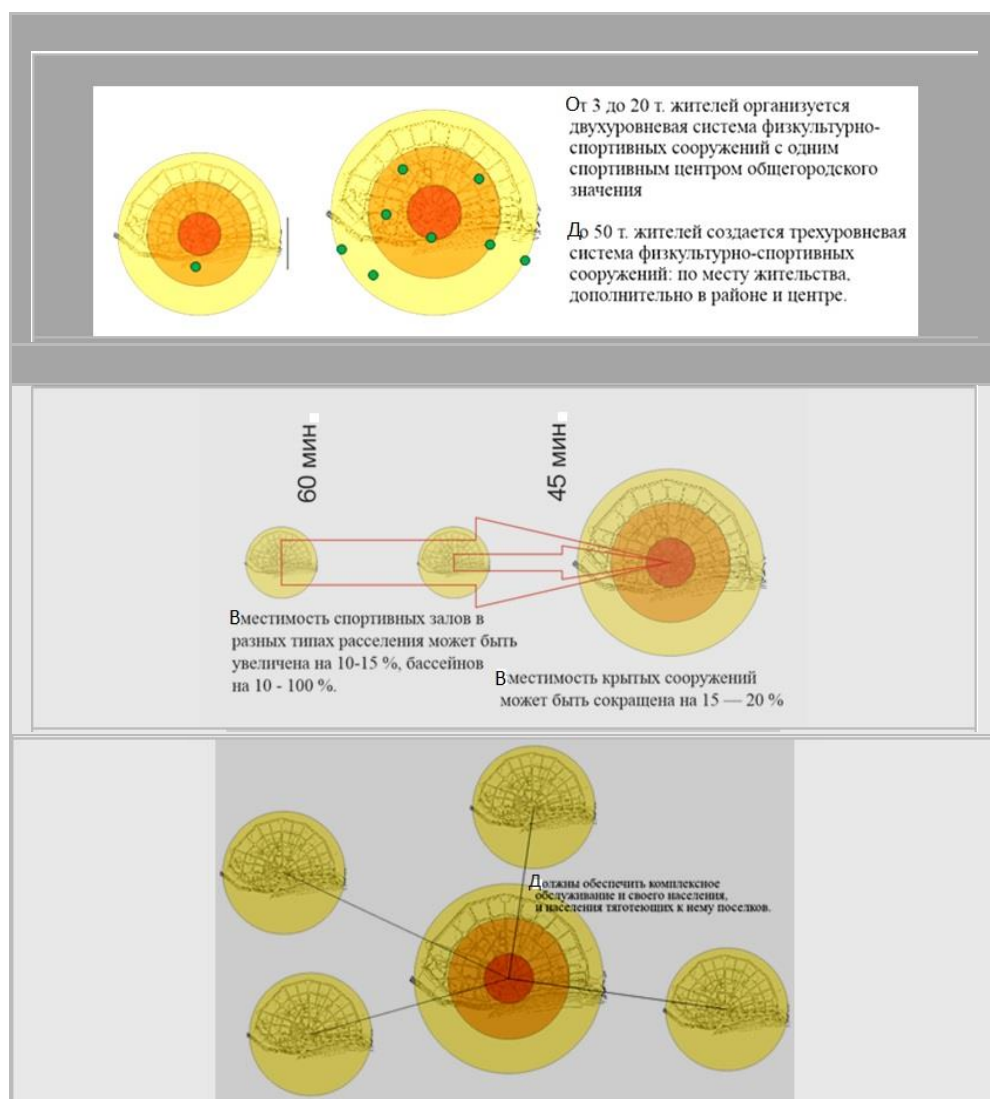


Рис. 2. Алгоритм построения спортивных зон в ЛГС (автор В.А. Воробьев)

Особенность состоит в том, что сегодня большинство площадок локально закрыты от сторонних посетителей, они, с одной стороны, обеспечивают контроль безопасности, чистоты, а с другой – усиливают роль классовой разницы в обществе. Подобная политика используется не везде, и в парковых зонах, к примеру, работает практически открытая система. Однако большим недостатком локальных открытых зон является их быстрый износ и отсутствие обслуживания таких территорий. Поэтому политика грубой утилитарности и типизации порой выступает ключевой в развитии территориального планирования и обеспечения территории спортивными зонами. Культурный аспект в данной связи зависит от массового взаимодействия градостроительных узлов и лока-

ций, определяющих характер развития комфортной среды и развития человека, его физического и духовного состояния.

4. Дворовые территории как фрагмент развития социальных возможностей

Жилая среда любого крупного города включает в себя активное развитие дворовой территории как центра социальной активности и взаимодействия жителей по тем или иным интересам. От благоустройства, комфорта и безопасности этих зон зависит характер их использования и преобладания в них разнообразных событий. Центр общения делится на зоны, где спортивная и игровая отвечают за физическую активность, а прилегающие к ним зоны сопутствуют иному общению, наблюдению и отдыху. Современный опыт проектирования дворовых территорий и различных прилегающих зон вполне разнообразен и вбирает в себя анализ и предпочтения достаточно широкой массы людей, хоть и на достаточно поверхностном уровне. Потребность в универсальном спортивном оборудовании в ЛГС уже стала требовать уникальных включений и более современной конструктивной и планировочной модели, комфорта и многоплановости. Двор как градоформирующий центр ЛГС определяет перспективы развития всей территории, а также коммуникаций, которые развиваются во внутренней и внешней плоскости.

Большую роль здесь играют отношения: композиционные, архитектурные, функциональные, социальные и др. Любая локальная зона прилегающей территории воспринимается априори как преамбула, однако реальность ее жизнеспособностей мало кто учитывает. Проблематика «недоразвитости» прилегающих территорий и зон вполне актуальна, и сейчас она оперирует весьма весомыми аргументами в пользу целостного освоения территории, ее работы на благо коммуникативного взаимодействия и целостного восприятия. И вопрос здесь стоит не только в рациональном использовании площадей, но и в их эстетической и прикладной роли. Дворы и иные площадки часто превращают в парковки из-за острой в том потребности, вытесняя благоустройство и формы комфортного отдыха и развития человека. Подобная концепция весьма отличает российский опыт от зарубежного, где все стремятся к доминированию социальной роли, развитию и культуре физического и интеллектуального воспитания, а также градостроительной целостности и гармонии. Открытые и закрытые спортивные зоны предлагают различные условия использования, определяя тем самым подход к социальному и культурному взаимодействию. Помимо коммуникативных возможностей и спортивной пропаганды ЛГС развивает иные взаимодействия, повышая социальную активность в различных направлениях или, наоборот, понижая ее в зависимости от формирующих условий и предпосылок. Состояние среды всегда находится в прямой зависимости от состояния общества, и наоборот, поэтому здесь сложно утверждать, что первично в иерархии развития, используются и прямой, и обратный подходы. В становлении зон ЛГС участвует множество предпосылок и особенностей, стремящихся именно к доступности как спортивной инфраструктуры, так и иных объектов обслуживания населения. Доступность же, в свою очередь, расширяет не только функциональный спектр, но и связи в его пределах и в границах формирования крупных взаимодействий.

5. Парковые территории и бульвары – средства связи между пространством, функцией и развитием человека

Еще одной глобальной составляющей в данной теме является роль парковых и иных благоустроенных территорий городской среды в становлении и воспитании физической культуры человека. Парки и скверы, наполненные социальным многообразием, в проектном отношении требуют к себе повышенного внимания и учета не только поверхностных нужд, но и более уникальных форматов развития в спортивно-развлекательном и оздоровительном ключе. Интеграция в такие ЛГС необычных форм функционального обогащения спортивной среды позволяет обратить на себя внимание и проявить повышенный интерес как к эстетическим, так и конструктивным особенностям объекта, наполнить его не только физической культурой, но и духовно-эстетической для того, чтобы максимально расположить к себе различные социальные группы и предоставить для них весь необходимый потребительский функционал. Подобные рекреационные территории общественного характера формируют также устойчивую связь между иными ЛГС, выступая коммуникационным порталом между ними и образуя сеть более плотной функциональной организации и возможностей распространения и популяризации активного образа жизни, высокой культуры как физического, так и духовного восприятия. Небольшие парки и скверы, помимо всего, являются связующим звеном объектов среднего и низкого развития, где функционально-смысловой и образно-пластический потенциал не имеет возможностей для широкого роста.

Таким образом, в данной ситуации рекреационные территории остаются единственной ЛГС, где преобладает общественная социальная модель культурного взаимодействия и развития спортивной инфраструктуры. В то же время парки и скверы, являясь априори средой социальной активности, в том или ином виде заставляют более организованно подходить к внутреннему планированию и гармонизации спортивных зон с природной составляющей, для того чтобы максимально сохранить исходное состояние и наполнить его функциональной содержательностью и эстетическим импульсом.

6. Особенности оборудования спортивных зон в ЛГС, их приоритеты и цели

Содержательная часть спортивной инфраструктуры в ЛГС представляет собой наиболее рациональный и общедоступный спектр инвентарного оборудования, который удовлетворяет потребности широкого круга людей и обеспечивает простоту эксплуатации и безопасность. Открытые зоны и площадки организуются благодаря устойчивой форме технического клише, адаптивной и трансформативной в отношении практически любой территории. Спортивные поля и иные открытые пространства обеспечивают условия для коллективного взаимодействия в сезонной эксплуатации. Различные клубы и тренажерные залы определяют инвентарный состав и прочий характер содержательности, исходя из своих тематических условий и предпосылок, представляющих различные функциональные форматы для потенциального потребителя.

Окружающая среда нередко определяет сортамент оборудования, ориентируясь на социальную прослойку и культурный уровень самой среды,

градостроительные факторы и особенности, а также актуализированные факторы роста культурных ценностей и развития физической культуры. Формирование рекреационных сетей со спортивным функционалом расширяет границы культурного роста и социального взаимодействия в ЛГС, организуется преобразовательный импульс в отношении подходов к использованию среды, ее наполнению и обогащению.

Конечно, ключевым приоритетом насыщения спортивных объектов и различных зон является их доступность для разных слоев населения и возрастных групп, ведь ЛГС обладает высоким запросом на данный фактор, касающийся не только спорта, но и иных функциональных объектов обслуживания человека. В свою очередь, целью спортивных зон, площадок и объектов в ЛГС является ориентация на максимальное сохранение действенной активности общества внутри каждой такой ЛГС. Человеку предоставляется первоочередной спектр доступных форм деятельности, направленный на внутреннее развитие культуры той среды, в которой он пребывает постоянно, устанавливая внутри нее новые связи и коммуникации посредством развития функциональных форм и методов внутреннего и внешнего обогащения.

Выводы

Впервые определено, что, рассматривая ЛГС с точки зрения целостных фрагментов городской среды и наличия в них функционального многообразия, среди которого можно выделить актуализацию спортивно-оздоровительной инфраструктуры, следует отметить важнейшую коммуникативную роль подобных зон, их влияние на становление и развитие образа жизни человека, его здоровья, интеллектуального и духовного насыщения.

Нами установлено, что спортивные площадки, поля закрытого и открытого типа, залы, секции и многое другое – все это структурно формирует отдельные локации в городской среде, обогащая их культурный функциональный потенциал, делая среду физического воспитания доступной, а образ жизни человека многообразным, уравнивая его интеллектуальные и физические действия.

Полученные нами результаты подтвердили, что с точки зрения градостроительного планирования и локального развития территорий спортивная инфраструктура интегрируется практически во все современные зоны города, расширяя их возможности и предоставляя комфортные условия для тематического времяпрепровождения. Преобладание автономных и интегрированных площадок всяческим образом укрепляет первичные потребности человека и создает устойчивую базу для проведения досуга.

Анализ позволяет утверждать, что в срезе социальной композиции спортивные объекты ЛГС отвечают местным требованиям и непременно располагают к доступному развитию физического здоровья человека, внося в него изначально духовную доминанту и важность, затем силу воли и, наконец, физический результат. Отвечая, таким образом, за социальное проектирование, спортивная среда настраивает различные связи, определяя формы поведения человека, его алгоритмы жизнедеятельности, привычки. ЛГС является связующим звеном внутренних и внешних компонентов города, она развивает внутреннее планирование, более близкое к сознанию и жизни человека, его первичным ценностям.

Спорт в данной связи является формой активного просвещения, развивающейся сегодня уже в формате целого стиля, являющегося атрибутом образа жизни.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аль дарф Бушра, Перькова М.В., Коврижкина О.В.* Современные тенденции в проектировании и строительстве спортивных сооружений // Вестник БГТУ им. Шухова. 2016. № 1. С. 62–67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25070599>
2. *Батаев М.* Стадионы. Трансформация типологии // Архитектура. Строительство. Дизайн. 2012. № 1. С. 65–69.
3. *Белоносов С.А.* Архитектурное формирование перспективных многофункциональных спортивных комплексов (в крупных индустриальных городах) : диссертация на соискание ученой степени канд. архитектуры. Екатеринбург : Урал. гос. архитектурно-художественная акад., 2009. 165 с.
4. *Бузырев В.В., Нужина И.П., Золотарева М.В.* Влияние социальных и экологических факторов на градостроительную деятельность на развивающихся урбанизированных территориях // Проблемы современной экономики. 2017. № 3 (63). С. 210–214.
5. *Винокурова Е.А.* Обоснование строительства спортивных объектов в городской среде // Северный морской путь, водные и сухопутные транспортные коридоры как основа развития Сибири и Арктики в XXI веке : сб. тезисов докладов участников Международного конкурса научных работ XX Международной научно-практической конференции. 2018. С. 178–183.
6. *Воронов А.М.* Проблемы и перспективы внедрения Всероссийского физкультурно-спортивного комплекса «Готов к труду и обороне» в Республике Карелия // Вестник Российского Международного Олимпийского Университета. 2016. № 2 (19). С. 46–51.
7. *Гурьева Е.И., Федорова А.П.* Градозэкологические принципы развития территории Курской области на примере Горшечного района // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2020. № 2 (45). С. 44–49.
8. *Гурьева Е.И., Яньшина Н.А.* Социально-психологические факторы в градостроительной политике на примере Воронежской агломерации // Строительство и реконструкция. 2019. № 5 (85). С. 96–107.
9. *Енин А.Е., Заплавная А.Э.* Преобразование жилой среды в современных крупных городах (системный подход и анализ) // Архитектурные исследования. 2020. № 4 (24). С. 76–85.
10. *Енин А.Е.* Проблемы экспериментальной проверки сложных многоуровневых объектов типа «население – среда» // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2012. № 11. С. 13–18.
11. *Зобова М.Г.* Принципы архитектурно-градостроительного проектирования и модернизации физкультурно-спортивных комплексов (на примере городского округа Самара) : диссертация на соискание ученой степени канд. архитектуры. Нижний Новгород : Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2009. 119 с.
12. *Зрнзевич Н., Цветкович Р., Зрнзевич Й.* Спортивные объекты как важный фактор развития архитектуры города // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 90–96.
13. *Копытова Н.В., Мартюшева А.И.* Проблемы классификации объектов спортивно-оздоровительной индустрии // Приоритетные направления развития образования и науки : сб. материалов IV Международной научно-практической конференции / Редколлегия: О.Н. Широков [и др.]. 2017. С. 180–181.
14. *Кривченков В.В.* Социальные технологии управления устойчивым развитием многофункциональных спортивных комплексов : автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. социол. наук / Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Белгород, 2016.
15. *Федорова О.В.* Архитектурно-пространственная трансформация спортивных сооружений // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2012. № 2. С. 66–69. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/arhitekturno-prostranstvennaya-transformatsiya-sportivnyh-sooruzheniy>

16. *Barghchi M.* Sports facilities in urban areas: trends and development considerations // *Pertanika Journal of Social Science and Humanities*. 2010. V. 18. I. 2. P. 427–435. URL: https://www.researchgate.net/publication/242654195_Sports_Facilities_in_Urban_Areas_Trends_and_Development_Considerations
17. *Chapin T.S.* Sports facilities as urban redevelopment catalysts: Baltimore's Camden Yards and Cleveland's Gateway // *Journal of The American Planning Association*. 2004. V. 70. № 2. P. 193–209. URL: [https://www.cdfa.net/cdfa/cdfaweb.nsf/ord/e9e4f2ed094eee898825793600641064/\\$file/sportsfacilities1.pdf](https://www.cdfa.net/cdfa/cdfaweb.nsf/ord/e9e4f2ed094eee898825793600641064/$file/sportsfacilities1.pdf) DOI: 10.1080/01944360408976370
18. *Grieve J.* Community benefits of major sport facilities: The Darebin International Sports Centre // *Sport Management Review*. 2012. V. 15. I. 2. P. 218–229. DOI: 10.1016/j.smr.2011.03.001
19. *Hudec M.* Adaptability in the architecture of sport facilities // *Procedia Engineering*. 2016. V. 161. P. 1393–1397. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.599
20. *Lee S.* A new approach to stadium experience: the dynamics of the sensoryscape, social interaction, and sense of home // *Journal of Sport Management*. 2012. V. 26. I. 6. P. 490–505. DOI: 10.1123/jsm.26.6.490
21. *Mason D.S.* Sports facilities and urban development: an introduction // *City, Culture and Society*. 2012. V. 3. I. 3. P. 165–167. DOI: 10.1016/j.ccs.2012.11.002

REFERENCES

1. *Al' darf Bushra, Per'kova M.V., Kovrizhkina O.V.* Sovremennye tendentsii v proektirovanii i stroitel'stve sportivnykh sooruzhenii [Modern trends in design and construction of sports facilities]. *Vestnik BGTU im. Shukhova*. 2016. No. 1. Pp. 62–67. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25070599> (rus)
2. *Bataev M.* Stadiony. Transformatsiya tipologii [Typology transformation]. *Arkhitektura. Stroitel'stvo. Dizain*. 2012. No. 1. Pp. 65–69. (rus)
3. *Belonosov S.A.* Arkhitekturnoe formirovanie perspektivnykh mnogofunktsional'nykh sportivnykh kompleksov (v krupnykh industrial'nykh gorodakh): dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kand. arkhitektury [Architecture of promising multifunctional sports complexes in large industrial cities. PhD Thesis]. Ekaterinburg, 2009. 165 p. (rus)
4. *Buzyrev V.V., Nuzhina I.P., Zolotareva M.V.* Vliyanie sotsial'nykh i ekologicheskikh faktorov na gradostroitel'nyu deyatelnost' na razvivayushchikhsya urbanizirovannykh territoriyakh [The impact of social and environmental factors on urban planning in developing urbanized areas]. *Problemy sovremennoi ekonomiki*. 2017. No. 3 (63). Pp. 210–214. (rus)
5. *Vinokurova E.A.* Obosnovanie stroitel'stva sportivnykh ob'ektov v gorodskoi srede [Rationale for the construction of sports facilities in an urban environment]. In: *Severnii morskoi put', vodnye i sukhoputnye transportnye koridory kak osnova razvitiya Sibiri i Arktiki v 21 veke: sb. tezisov dokladov uchastnikov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh rabot XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. Int. Compet. 'Northern Sea Route, Water and Land Transport Corridors for the Development of Siberia and the Arctic in the 21st Century')*. 2018. Pp. 178–183. (rus)
6. *Voronov A.M.* Problemy i perspektivy vnedreniya vs Rossiiskogo fizkul'turno-sportivnogo kompleksa "Gotov k trudu i oborone" v Respublike Kareliya [Problems and prospects of implementation of the All-Russian Physical Culture and Sports Complex "Ready for Labor and Defense" in the Republic of Karelia]. *Vestnik Rossiiskogo Mezhdunarodnogo Olimpiiskogo Universiteta*. 2016. No. 2 (19). Pp. 46–51. (rus)
7. *Gur'eva E.I., Fedorova A.P.* Gradoekologicheskie printsipy razvitiya territorii Kurskoi oblasti na primere Gorshechnogo raiona [Urban ecological principles of development of the Kursk region in the Gorshechny district]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN*. 2020. No. 2 (45). Pp. 44–49. (rus)
8. *Gur'eva E.I., Yan'shina N.A.* Sotsial'no-psikhologicheskie faktory v gradostroitel'noi politike na primere Voronezhskoi aglomeratsii [Socio-psychological factors in urban planning policy in Voronezh agglomeration]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. No. 5 (85). Pp. 96–107. (rus)
9. *Enin A.E., Zaplavnaya A.E.* Preobrazovanie zhiloi sredy v sovremennykh krupnykh gorodakh (sistemnyi podkhod i analiz) [Systemic approach and analysis of transformation of living environment in modern large cities]. *Arkhitekturnye issledovaniya*. 2020. No. 4 (24). Pp. 76–85. (rus)

10. Enin A.E. Problemy eksperimental'noi proverki slozhnykh mnogourovnevnykh ob"ektov tipa naselenie–sreda [Problems of experimental verification of multilevel objects of the population-environment type]. *Vestnik tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk*. 2012. No. 11. Pp. 13–18. (rus)
11. Zobova M.G. Printsipy arkhitekturno-gradostroitel'nogo proektirovaniya i modernizatsii fizkul'turno-sportivnykh kompleksov (na primere gorodskogo okruga Samara): dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kand. arkhitektury [Principles of architectural and urban design and modernization of sports complexes (the Samara district case studies), PhD Thesis]. Nizhnii Novgorod, 2009. 119 p. (rus)
12. Zrnzevich N., Tsvetkovich R., Zrnzevich I. Sportivnye ob"ekty kak vazhnyi faktor razvitiya arkhitektury goroda [Sports facilities as an important factor in the development of urban architecture]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2017. No. 2. Pp. 90–96. (rus)
13. Kopytova N.V., Martyusheva A.I. Problemy klassifikatsii ob"ektov sportivno-ozdorovitel'noi industrii [Classification of sports and health industry facilities]. In: *Prioritetnye napravleniya razvitiya obrazovaniya i nauki: sb. materialov 4 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. 4th Int. Sci. Conf. 'Priority Trends in the Development of Education and Science)*. 2017. Pp. 180–181. (rus)
14. Krivchenkov V.V. Sotsial'nye tekhnologii upravleniya ustoychivym razvitiem mnogofunktsional'nykh sportivnykh kompleksov: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kand. sotsiol. nauk [Social technologies for managing the sustainable development of multifunctional sports complexes. PhD Abstract]. Belgorod, 2016. (rus)
15. Fedorova O.V. Arkhitekturno-prostranstvennaya transformatsiya sportivnykh sooruzhenii. Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN. 2012. No.2. Pp. 66–69. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/arhitekturno-prostranstvennaya-transformatsiya-sportivnyh-sooruzheniy> (rus)
16. Barghchi M. Sports facilities in urban areas: Trends and development considerations. *Pertanika Journal of Social Science and Humanities*. 2010. V. 18. No. 2. Pp. 427–435. Available: www.researchgate.net/publication/242654195_Sports_Facilities_in_Urban_Areas_Trends_and_Development_Considerations
17. Chapin T.S. Sports facilities as urban redevelopment catalysts: Baltimore's Camden Yards and Cleveland's Gateway. *Journal of the American Planning Association*. 2004. V. 70. No. 2. Pp. 193–209. Available: [www.cdfa.net/cdfa/cdfaweb.nsf/ord/e9e4f2ed094e4ee898825793600641064/\\$file/sportsfacilities1.pdf](http://www.cdfa.net/cdfa/cdfaweb.nsf/ord/e9e4f2ed094e4ee898825793600641064/$file/sportsfacilities1.pdf) DOI: 10.1080/01944360408976370
18. Grieve J. Community benefits of major sport facilities: The Darebin International Sports Centre. *Sport Management Review*. 2012. V. 15. No. 2. Pp. 218–229. DOI: 10.1016/j.smr.2011.03.001
19. Hudec M. Adaptability in the architecture of sport facilities. *Procedia Engineering*. 2016. V. 161. Pp. 1393–1397. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.599
20. Lee S. A new approach to stadium experience: the dynamics of the sensoryscape, social interaction, and sense of home. *Journal of Sport Management*. 2012. V. 26. No. 6. Pp. 490–505. DOI: 10.1123/jism.26.6.490
21. Mason D.S. Sports facilities and urban development: an introduction. *City, Culture and Society*. 2012. V. 3. No. 3. Pp. 165–167. DOI: 10.1016/j.ccs.2012.11.002

Сведения об авторах

Гурьева Елена Ивановна, канд. с.-х. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, gurjeva_el@mail.ru

Воробьев Владимир Александрович, магистр, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, 394006, vorobevvladimir1997@gmail.com

Authors Details

Elena I. Gur'eva, PhD, A/Professor, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, gurjeva_el@mail.ru

Vladimir A. Vorob'ev, Master, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, Russia, vorobevvladimir1997@gmail.com

УДК 72.012.6

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-62-69

*О.Т. ИЕВЛЕВА, И.И. ЧИКАЕВ,
Южный федеральный университет*

СТРУКТУРИЗАЦИЯ ТВОРЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье рассматриваются существующие теоретические подходы к архитектурному формированию фасадов зданий.

Выявляются основные существующие алгоритмы проектного мышления и способы фиксации творческой мысли, реализуемые через «архитектурный образ».

Приводится краткий обзор основных способов формообразования фасадных решений.

Предложена обобщенная функциональная модель творческого процесса формирования образного решения фасадов зданий.

Ключевые слова: фасад, формообразование, архитектурные решения, теоретические подходы, алгоритмы проектного мышления, фиксация творческой мысли

Для цитирования: Иевлева О.Т., Чикаев И.И. Структуризация творческого процесса формирования архитектурных решений фасадов зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 62–69.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-62-69

*О.Т. IEVLEVA, I.I. CHIKAEV,
Southern Federal University*

STRUCTURING THE CREATIVE FORMATION PROCESS OF BUILDING FACADE ARCHITECTURE

Abstract. The article discusses theoretical approaches to the architecture of building facades. The main algorithms are identified for the project thinking and creative thoughts implemented by the architectural image. A review is given to the main ways of facade solutions. As a result, a generalized functional model is proposed for the creative process when forming a figurative solution for building facades.

Keywords: facade, architectural solutions, theoretical approach, project thinking algorithm, creative thought

For citation: Ievleva O.T., Chikaev I.I. Strukturizatsiya tvorcheskogo protsessa formirovaniya arkhitekturnykh reshenii fasadov zdanii [Structuring the creative formation process of building facade architecture]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 62–69.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-62-69

Жителей современных городов в первую очередь интересует и волнует зрительное восприятие городской архитектуры, особенно в городе, в котором

они живут. Поэтому необходимо уделять особое внимание архитектурному решению фасадов зданий. В ответ на запросы общества сегодня одним из основных тезисов архитектурно-градостроительного проектирования является формирование комфортной городской среды, которая в том числе включает в себя создание комфортной визуально-образной среды. Таким образом, архитектурные решения фасадов зданий являются трансляторами «архитектурного образа здания» [1] в городскую среду современного города.

Вместе с тем любой архитектурный образ формируется через призму задуманной архитектурно-художественной идеи автора с учетом своей системы эстетических представлений «красивого» [2]. В процессе творческой деятельности по поиску образного решения архитектуру необходимо эвристически синергировать субъективные (чувственное знание) и объективные (рациональное знание) факторы, влияющие на итоговый результат образа.

Для реализации вышеуказанной задачи архитектор должен, с учетом полученных исходных сведений и информации о будущем объекте, последовательно разрабатывать концептуальную идею архитектурного образа от общего объема информации, переходя к детализации, формируя мелкими мазками форму, пошагово развивая замысел [3].

Стоит отметить, что структурирование фундаментальных процессов проектного мышления и становление смысловых связей творческого поиска главной идеи проекта (базовой формы) предложили Т.В. Каракова и К.Д. Барова в работе [4], выделив определенную стадийность проектного мышления при творческом поиске архитектурной образности проекта с учетом конвергентности индивидуальных ментальных особенностей и специфики профессиональной деятельности архитектора, а В.И. Иовлев разработал модель-схему нелинейного характера перебора вариантов и принятия решений в процессе творческого поиска замысла, состоящего из «знаков» и «содержания» образа базовой формы, установив, что полифоническое пересечение «векторов» разнообразных вариантов решений и способов их принятия является перекрещивающимся линейным процессом [5].

Целесообразно предположить, что в процессе поиска базовой формы проекта происходит формирование креативного информационно-эмоционального поля процессов творческого поиска [6] и в указанном процессе возникает взаимопроникновение частей полей различных вариантов решений друг в друга, синтезируя между собой новые смешанные решения для реализации замысла.

Вместе с тем С.В. Норенков в работе «Научные исследования: проектный синтез» [7] указывает на неперенную особенность современной созидательной деятельности архитектора – возможность творчески «перевести замысел через проектные формы» в визуальную информацию.

Таким образом, с целью формирования общей архитектурной идеи проекта – базовой формы и дальнейшего развития фундаментальных процессов проектного мышления – необходимо выделить алгоритмы проектного мышления («перевод замысла») и способы их фиксации («проектные формы»).

Интересную последовательность формирования алгоритма творческого поиска сформулировали Ю.И. Кармазин и Е.В. Кокорина [8]. Указанная последовательность предусматривает структуризацию стадийности поиска творче-

ского замысла главной идеи проекта с помощью схематической организации и графической проработки формирования архитектурного образа как способа реализации рассматриваемой схемы.

Предложенной блок-схемой предусматриваются определенные этапы решения творческой задачи, направленной на разработку базовой формы архитектурного образа, через графическое оформление эскиза главной идеи проекта.

Таким образом формируется базовая форма главной идеи проекта – путем графического кодирования задуманных знаков и символов от абстрактной ментальной формы к конкретной визуализации на бумаге. Вместе с тем в ходе фиксации замысла проекта необходимо разбивать процесс сочинительства на последовательные фазы, переходя от общего к частному, и в ходе эвристического поиска стремиться к новизне в формообразовании [9].

Архитектурная графика выступает «конкретным и образным языковым кодом изложения творческих идей» автора, подсказывает, развивает процесс формирования творческого замысла архитектора [10] и является наиболее емким способом трансляции идеи образа.

Исходя из вышеизложенного, можно выделить структурированные подходы к формализации проектного мышления на этапе формирования и поиска базовой формы главной идеи архитектурного проекта, при этом основным транслятором эвристического мышления креативной идеи является рисунок как способ графического кодирования и фиксации творческого замысла – как воплощение «мысли на кончике пера» [11].

Другой подход к формализации проектного мышления предлагает математика – компьютерное моделирование по заданному программному алгоритму [12].

Для создания программного алгоритма необходимо выделить стадийности формирования базовой формы проекта: сбор и обработка исходных данных, формализация процесса проектирования по заданному математическому методу и оценка (корректировка) полученных результатов в ходе автоматизированной работы программного кода.

Однако в ходе автоматизации процесса формирования базовой формы существуют определенные пробелы интеграции математических кодов в архитектурное проектирование, теряется значимость «творческого полета» автора. Характерная «игра в проектирование» [13] по заданному математическому алгоритму позволяет автору находить новые интересные композиционные решения, сохраняя при этом интуитивность принятия определенных проектных решений.

Таким образом, алгоритмическое проектирование (компьютерное моделирование) предлагает множество разнообразных вариантов формирования базовой формы архитектурного проекта в соответствии с математически заданным программным алгоритмом [14].

Более широко, и вместе с тем более математически формально, компьютерное моделирование рассматривали В.Н. Бабич и А.Г. Кремлев [15]. Они отмечают, что развитие социотехнологических изменений требует фиксации творческой мысли в графическом представлении, описание которого благодаря компьютерному моделированию по заданному математическим кодом алгоритму приближается к максимальной структурной организации всех компо-

нентов, ясности и точности, что не всегда возможно реализовать буквальными средствами. Вектор развития актуальной математизации архитектуры, определенной в параметризации и алгоритмизации процесса проектирования, представляется как эффективная система средств информационно-математического моделирования.

Авторами предлагается определенный математический (программный) алгоритм, автоматизированный для получения определенных вариантов проектных решений главной идеи архитектурного объекта с учетом заданных параметров исходных данных различного характера в процессе формирования объемно-пространственных и образных решений главной идеи проекта.

Формирование архитектурных решений происходит поэтапно, посредством выбора объемных и конструктивных решений, определяющих структуру объекта, выполненных в соответствии с требованиями нормативных документов и регламентов, с учетом технических условий, включающих в себя разнообразные факторы, как социально-технологические, так и природно-климатические, в целях дальнейшего функционирования объекта.

Обобщая существующие подходы проектного мышления, стоит отметить, что структуризация поиска главной идеи (базовой формы) архитектурного объекта позволяет последовательно реализовывать трансляцию эвристического представления концептуального образа путем графического кодирования или математического алгоритма с учетом осознанного процесса архитектурного проектирования для дальнейшей детальной проработки.

Дальнейшая детализация базовой формы главной идеи проекта происходит путем формообразования в более детальном изложении посредством последовательных итераций.

Подходы к формообразованию фасадных решений подразумевают под собой набор определенных морфологических и синтаксических закономерностей, а также инструментов исходных базовых элементов для формирования решений фасадов в границах конкретной образно-семантической принципиальной «системы» путем дальнейшей детальной разработки главной идеи проекта – базовой формы.

В результате анализа существующих подходов к формообразованию фасадных решений были выделены четыре основных направления.

1. Конструктивные подходы к формообразованию. Они основываются на формировании базовой формы архитектурного объекта, главным образом отталкиваясь от характеристик выбранной основной (несущей) строительной конструкции, дополнительной конструкции (фасадные элементы) или фасадного материала.

2. Композиционно-художественные подходы к формообразованию. Их главные принципы могут на фундаментальном уровне влиять на выразительность архитектурного образа зданий и сооружений, основываясь на базовых художественных и композиционных принципах. В процессе поиска новых форм они способны подчеркнуть ключевую особенность строительной конструкции, обыграть пустую стену, предполагаемую к облицовыванию одним однородным материалом, путем изменения рисунка укладки, вводя элемент контролируемой случайности или регулярности ритма.

3. Средовые подходы к формообразованию. Они основаны на методике проектирования и строительства, опирающейся на принципы формообразования архитектурных объектов, адаптивно вписывающихся в окружающую среду [16], как архитектурно-градостроительную, так и экологическую, с учетом окружающих образов и «узоров», подстраиваясь под изменяющиеся требования общества и технологического прогресса.

4. Математические подходы к формообразованию. Это подходы, основанные на математических алгоритмах, позволяющих реализовывать разнообразные экспериментальные подходы и технические приемы к архитектурному формообразованию с помощью компьютерных технологий. Рассматриваемые подходы позволяют параметризовать определенные характеристики проектируемого объекта, и его дальнейшая развертка происходит согласно заданной закономерности с прогнозируемым результатом.

Результаты анализа существующих подходов к формализации процесса формирования архитектурных решений, а также выявленные основные подходы к формообразованию позволили предложить обобщенную функциональную модель творческого процесса формирования образного решения фасадов зданий (рисунок).



Обобщенная модель творческого процесса архитектурного формирования решений фасадов зданий

Модель состоит из двух последовательных блоков взаимосвязей мыслительных действий:

– поиск образа базовой формы главной идеи проекта через подходы проектного мышления (математическое или графическое кодирование) с дальнейшей фиксацией творческого замысла путем компьютерного моделирования или эскизного рисунка;

– детализация образованной базовой формы главной идеи проекта определенными подходами формообразования (конструктивными, художественными, средовыми) путем разработки формы различными способами математического и графического кодирования, а также как следствие конвергентности обоих способов в процессе проектного мышления – компьютерное моделирование, отталкивающееся от формы, найденной путем графического или математического кодирования.

Заключение

Таким образом, творческий процесс формирования архитектурных решений фасадов зданий может быть структурирован путем последовательного поиска формы от базовой концепции идеи до детализированной формы различными подходами к формообразованию, через кодирование творческого замысла графическим способом (рисунок) или математическим (компьютерное моделирование) с учетом конвергентности обоих способов через синтез и взаимопроникновение.

Предложенная обобщенная модель может послужить базой для исследования и разработки системы формализованных методов и приемов архитектурного формирования фасадов зданий, зависящих от конкретной проектной ситуации и основанных на различных подходах проектного мышления и принципах формообразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванова О.А.* Особенности формирования архитектурного образа столичного города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 4. С. 43–49. URL: catalog.tsuab.ru/portal/Vestnik_TSUAB/2008-4/4-2008-05-ivanova.pdf
2. *Ryan Daniel.* Exploring creativity through artists' reflections // Creativity Studies. 2021. № 1. P. 1–17. URL: researchonline.jcu.edu.au/65684/1/DANIEL.pdf
3. *Shanta Pragyash Dash.* An exploratory study on design process in architecture: perspective of creativity // Creativity Studies. 2021. № 2. P. 346–361. URL: journals.vilniustech.lt/index.php/CS/article/view/12989/10723
4. *Каракова Т.В., Барова К.Д.* Графическая визуализация как инструмент проектного мышления и моделирования в архитектуре // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2012. № 1. URL: journals.eco-vector.com/2542-0151/article/view/53912
5. *Иовлев В.И.* Концептуальный механизм архитектурного проектирования // Архитектон: известия вузов. 2021. № 1. URL: archvuz.ru/2021_1/23
6. *Navid Gohardani.* Architecture and design research: Reflections in relation to the design process // International Journal of Architectural Research Archnet-IJAR. 2011. № 3. P. 107–115. URL: researchgate.net/publication/265219397_Architecture_and_design_research_Reflections_in_relation_to_the_design_process
7. *Норенков С.В.* Научные исследования: проектный синтез. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2011. 217 с.

8. Кармазин Ю.И., Кокорина Е.В. Проектное моделирование – этап разработки главной идеи проекта // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2010. № 1. С. 167–175.
9. Богомолов И.И. К проблеме сочинительства в объемно-пространственном формообразовании // Архитектон: известия вузов. 2004. № 3. URL: archvuz.ru/2004_3/4
10. Кокорина Е.В. Архитектурный рисунок как форма проектного моделирования в основе профессиональных коммуникаций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 2. С. 133–142.
11. Paul Klee. The Thinking Eye. The Notebooks of Paul Klee. Volume I. San Francisco : Wittenborn Art Books, 2013. 588 p.
12. Tedeschi A. AAD Algorithms-Aided Design. Parametric Strategies Using Grasshopper. Brienza Italy : Le Penseur, 2014. 498 p.
13. Титов С.С., Горнева О.С. Проблемы интеграции математических методов в архитектурное проектирование // Архитектон: известия вузов. 2013. № 1. URL: archvuz.ru/2013_1/2
14. Бжахов М.И. Алгоритмическое проектирование в архитектуре // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4913
15. Бабич В.Н. Аспекты математизации архитектуры в постнеклассический период // Архитектон: известия вузов. 2016. № 1. URL: archvuz.ru/2016_1/2
16. Гиясов А.И. Биоархитектура – современный взгляд на подземное строительство // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5670

REFERENCES

1. Ivanova O.A. Osobennosti formirovaniya arhitekturnogo obraza stolichnogo goroda [Formation of architectural image of the capital city]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2008. No. 4. Pp. 43–49. Available: catalog.tsuab.ru/portal/Vestnik_TSUAB/2008-4/4-2008-05-ivanova.pdf (rus)
2. Ryan Daniel. Exploring creativity through artists' reflections. *Creativity Studies*. 2021. V. 14. No. 1/ Pp. 1–17. Available: researchonline.jcu.edu.au/65684/1/DANIEL.pdf
3. Shanta Pragyan Dash. An exploratory study on design process in architecture: Perspective of creativity. *Creativity Studies*. 2021. V. 14. No. 2. Pp. 346–361. Available: journals.vilnius-tech.lt/index.php/CS/article/view/12989/10723
4. Karakova T.V., Barova K.D. Graphic visualization as a tool of project thinking and modeling in architecture [Graphic visualization as a tool for architectural design and modeling]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2012. No. 1. Available: journals.eco-vector.com/2542-0151/article/view/53912 (rus)
5. Iovlev V.I. Conceptual mechanism of architectural design [Conceptual mechanism of architectural design]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2021. No. 1. Available: archvuz.ru/2021_1/23 (rus)
6. Navid Gohardani. Architecture and design research: Reflections in relation to the design process. *International Journal of Architectural Research*. 2011. V 5. No. 3. Pp. 107–115. Available: researchgate.net/publication/265219397_Architecture_and_design_research_Reflections_in_relation_to_the_design_process
7. Norenkov S.V. Nauchnye issledovaniya: proektnyi sintez [Scientific research: Design synthesis]. Nizhny Novgorod: NNGASU, 2011. 217 p. (rus)
8. Karmazin Yu.I., Kokorina E.V. Proektnoe modelirovanie - etap razrabotki glavnoi idei proekta [Design modeling as a stage of developing the main project idea]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2010. No. 1. Pp. 167–175. (rus)
9. Bogomolov I.I. K probleme sochinitel'stva v ob'emno-prostranstvennom formoobrazovanii [The problem of writing in volume-spatial shaping]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2004. No. 3. Available: archvuz.ru/2004_3/4 (rus)
10. Kokorina E.V. Arkhitekturnyi risunok kak forma proektnogo modelirovaniya v osnove professional'nykh kommunikatsii [Architectural drawing as design modeling in professional communication]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2011. No. 3. Pp. 133–142. (rus)

11. *Paul Klee*. The thinking eye. The notebooks of Paul Klee. Vol. 1. San Francisco: Wittenborn Art Books, 2013. 588 p.
12. *Tedeschi A.* Algorithms-aided design. Parametric strategies using grasshopper. Brienza Italy: Le Penseur, 2014. 498 p.
13. *Titov S.S., Gorneva O.S.* Problems of integration of mathematical methods in architectural design [Problems of integration of mathematical methods in architectural design]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2013. No. 1. Available: archvuz.ru/2013_1/2 (rus)
14. *Brzhakhov M.I.* Algoritmicheskoe proektirovanie v arkhitekture [Algorithmic design in architecture]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2018. No. 2. Available: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4913 (rus)
15. *Babich V.N.* Aspekty matematizatsii arkhitektury v postneklassicheskii period [Aspects of architecture mathematization in the post-non-classical period]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2016. No. 1. Available: archvuz.ru/2016_1/2 (rus)
16. *Giyasov A.I.* Bioarkhitektura – sovremennyy vzglyad na podzemnoye stroitel'stvo [Bioarchitecture as a modern look at underground construction]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2019. No. 1. Available: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5670 (rus)

Сведения об авторах

Иевлева Ольга Тихоновна, докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, ijevleva@sfedu.ru

Чикаев Илья Игоревич, аспирант, Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, chikaev@sfedu.ru

Authors Details

Ol'ga T. Ievleva, DSc, Professor, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str., 344006, Rostov-on-Don, Russia, ijevleva@sfedu.ru

Il'ya I. Chikaev, Research Assistant, Professor, Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str., 344006, Rostov-on-Don, Russia, chikaev@sfedu.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.045.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-70-80

Г.И. ГРЕБЕНЮК¹, В.И. МАКСАК¹, М.С. ВЕШКИН²,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Новосибирский государственный

архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ДВУХЭТАПНЫЙ ПРОЦЕСС ОПТИМИЗАЦИИ УПРУГИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ И ВАРЬИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВЫХ МАСС

Аннотация. Рассмотрена задача оптимизации упругих стержневых систем при импульсном нагружении в случае, когда вектор варьируемых параметров состоит из двух групп: группы геометрических параметров сечений элементов и группы дополнительных узловых масс. Для увеличения скорости сходимости предложен двухэтапный итерационный процесс оптимизации, где на каждой итерации решались две самостоятельные задачи оптимизации с различными целевыми функциями.

В качестве примера реализации предложенного двухэтапного процесса рассмотрена задача оптимизации пятиэтажной двухпролетной стальной рамы при действии кратковременной импульсной и статической нагрузок. Результаты решения поставленной задачи свидетельствуют об эффективности использования предложенного двухэтапного процесса оптимизации, а также дополнительных узловых масс в качестве варьируемых параметров.

Ключевые слова: стержневые системы, импульсные нагрузки, расчет, оптимизация, варьируемые параметры, методы поиска, оптимальное решение

Для цитирования: Гребенюк Г.И., Максак В.И., Вешкин М.С. Двухэтапный процесс оптимизации упругих стержневых систем при импульсном нагружении и варьировании параметров сечений элементов и дополнительных узловых масс // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 70–80.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-70-80

G.I. GREBENYUK, V.I. MAKSAK, M.S. VESHKIN,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering

TWO-STAGE OPTIMIZATION OF ELASTIC ROD SYSTEMS UNDER PULSE LOADING, VARIABLE PARAMETERS OF ELEMENT SECTIONS AND ADDITIONAL NODAL MASSES

Abstract. Optimization of elastic rod systems under pulsive loading is considered for the case when the vector of variable parameters consists of two groups: geometrical parameters of sections of elements and additional nodal masses. A two-stage iterative optimization process is proposed to increase the convergence rate, including two independent optimization problems with different objective functions solved for each iteration.

Optimization of a five-storey two-span steel frame under the pulse and static loads is implemented in the proposed two-stage process. The obtained results show the effectiveness of using the proposed two-stage optimization and additional nodal masses as variable parameters.

Keywords: rod system, pulse loading, calculation, optimization, variable parameters, search methods, optimal solution

For citation: Grebenyuk G.I., Maksak V.I., Veshkin M.S. Dvukhetapnyi protsess optimizatsii uprugikh stержnevyykh sistem pri impul'som nagruzhennii i var'irovaniy parametrov sechenii elementov i dopolnitel'nykh uzlovykh mass [Two-stage optimization of elastic rod systems under pulse loading, variable parameters of element sections and additional nodal masses]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 70–80.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-70-80

Введение

Динамические нагрузки, различающиеся характером изменения их во времени (гармонические, периодические, импульсные, произвольные), могут вызывать различный отклик на их действия. Гармонические и периодические воздействия опасны в силу возможной близости к частотам собственных колебаний систем и возможности резонанса. Для снижения негативного влияния подобных нагрузок на величины параметров НДС систем особо эффективны динамические гасители колебаний, создающие дополнительные гармонические воздействия в наиболее подходящих местах нагруженной системы [1, 2].

Импульсные нагрузки высокой мощности и небольшой продолжительности особо опасны для конструктивных систем, т. к. могут вызывать наибольшее влияние высокочастотных составляющих колебаний на амплитудные значения параметров НДС систем. Одним из наиболее эффективных приемов снижения негативного влияния подобных нагрузок на прочность систем является использование дополнительных компенсирующих масс. Это могут быть, в частности, большие стабилизирующие массы, требующие специальных устройств для их размещения [3–5]. С другой стороны, можно добиться эффекта существенного снижения влияния импульсной нагрузки путём размещения в узлах системы дополнительных узловых масс, сравнимых с собственными массами системы.

Задачам оптимизации стержневых систем при действии статических и динамических нагрузок посвящено немало работ [6–19]. Однако нередко в этих работах возможное динамическое воздействие представлено косвенно (например, через ограничения по частотам собственных колебаний [11–14]). В связи с этим особенности приложения динамических нагрузок во времени, как правило, не учитывались.

Представленная статья является развитием ранее выполненных работ по вопросам оптимизации упругих стержневых систем при импульсном воздействии [15–17].

Основной целью данного исследования является разработка эффективного алгоритма оптимизации стержневых систем при импульсном воздействии путём разделения его на этапы и использования в качестве варьируемых параметров, наряду с параметрами сечений элементов, дополнительных узловых масс.

Двухэтапный алгоритм оптимизации параметров дополнительных масс и параметров сечений элементов

Пусть NGE – число групп унификации элементов. Под группой унификации (группой объединения элементов ОЭ) будем понимать совокупность прямых стержней одинаковой длины и одинакового сечения.

Процесс оптимизации стержневой системы предполагает наличие предварительного этапа, на котором задаются начальные параметры системы, проводится расчёт на заданные воздействия и выполняется предварительный подбор параметров сечений элементов групп ОЭ из условий прочности.

В дальнейшем алгоритм оптимизации представляет собой двухэтапный итерационный процесс последовательного (поочерёдного) уточнения параметров дополнительных узловых масс и параметров сечений элементов групп ОЭ.

Этап 1. Оптимизация параметров дополнительных узловых масс при фиксированных параметрах сечений элементов групп ОЭ

Постановка задачи оптимизации дополнительных узловых масс на этапе 1 вызвана тем, что искомые дополнительные массы зависят, прежде всего, от характеристик импульсного воздействия и в малой степени зависят от параметров сечений элементов групп ОЭ. Выявив на этапе 1 оптимальные на данной итерации дополнительные узловые массы, можно переходить к этапу 2.

Задача оптимизации параметров дополнительных узловых масс ставится в форме задачи нелинейного математического программирования (НМП). В качестве целевой принята функция, представленная в следующем выражении и являющаяся показателем суммарной нагруженности элементов системы:

$$OF_1(X) = \sum_{i=1}^{NGE} \left(\sum_{j=1}^{KEG_i} \sigma_{eqv, j i_{\max}}(X) \cdot \ell_j \right), \quad (1)$$

где $X = (X_1, \dots, X_{kdm})$ – вектор варьируемых параметров дополнительных узловых масс, dm – общее число варьируемых параметров дополнительных узловых масс; $\sigma_{eqv, j i_{\max}}(X)$ – максимальное эквивалентное напряжение в j -м элементе, найденное согласно используемому критерию (теории) прочности;

NCE – число групп унификации элементов; KEG_i – количество элементов в i -й группе ОЭ; ℓ_j – длина элементов i -й группы ОЭ.

Общий вид ограничений, наложенных на систему, представим соотношением

$$g_j(X, P(X), R) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где $P(X)$ – вектор параметров состояния системы; R – вектор констант ограничений; m – общее число наложенных ограничений.

Условно-экстремальная задача (1), (2) преобразовывалась к безусловно экстремальной форме с использованием метода штрафов, когда к целевой функции (1) добавляются штрафы за нарушение ограничений:

$$\overline{OF}_1 = OF_1 + \sum_{j=1}^m k_j \cdot \max(0; g_j(X, P(X), R)), \quad (3)$$

где k_j – коэффициент штрафа.

После преобразования задачи к безусловно экстремальной требуется найти минимум $\overline{OF}_1$.

Так как в принятой постановке на этапе 1 решается, по сути, изопериметрическая задача по отношению к объему элементов системы, то стандартные ограничения по прочности и жесткости не учитывались, а задача оптимизации параметров дополнительных узловых масс сводилась к поиску безусловного минимума целевой функции $OF_1(X)$ и решалась на основе метода деформированного многогранника. Во избежание возможного существенного роста некоторых дополнительных масс (что часто конструктивно неизбежно), можно рекомендовать назначение максимально допустимой дополнительной узловой массы.

Этап 2. Оптимизация параметров сечения элементов групп ОЭ при фиксированных дополнительных узловых массах

Предполагая, что материал всех элементов одинаков, принимаем в качестве целевой функции на этапе 2 общий объем элементов системы:

$$OF_2(X) = \sum_{i=1}^{NGE} A_i(X_i) \cdot L_i, \quad (4)$$

где $X = (X_1^*, \dots, X_{NGE}^*)$ – вектор варьируемых параметров сечений элементов ОЭ; $A_i(X_i)$ – площадь сечения элементов i -й группы ОЭ; L_i – суммарная длина элементов i -й группы ОЭ.

Задача оптимизации системы на этапе 2 ставится и решается как задача НМП: требуется найти величины параметров сечений $X_1^*, \dots, X_{NGE}^*$, реализующие минимум целевой функции $OF_2(X)$ при соблюдении ограничений, наложенных на систему.

Общий вид ограничений, наложенных на систему, аналогичен ограничениям (2), принятым на этапе 1.

Решение условно-экстремальной задачи (4) на этапе 2 также проводилось на основе преобразования её к безусловно экстремальной форме с использованием метода штрафов, когда к целевой функции (4) добавляются штрафы за нарушение ограничений:

$$\overline{OF_2} = OF_2 + \sum_{j=1}^m k_j \cdot \max(0; g_j(X, P(X), R)). \quad (5)$$

Далее требуется найти минимум $\overline{OF_2}$.

Решение безусловно экстремальной задачи (5), как и на этапе 1, проводилось с использованием метода деформируемого многогранника.

В качестве критерия завершения изложенного двухэтапного процесса принято соотношение

$$\left| \overline{OF_2}(X^{*(k)}) - \overline{OF_2}(X^{*(k-1)}) \right| < \varepsilon, \quad (6)$$

где $k-1$ и k – номера соседних итераций; ε – заданная точность.

Пример решения задачи оптимизации стержневой системы

Рассмотрена задача оптимизации пятиэтажной двухпролетной рамы, нагруженной статической и импульсной нагрузками (рис. 1, а, б).

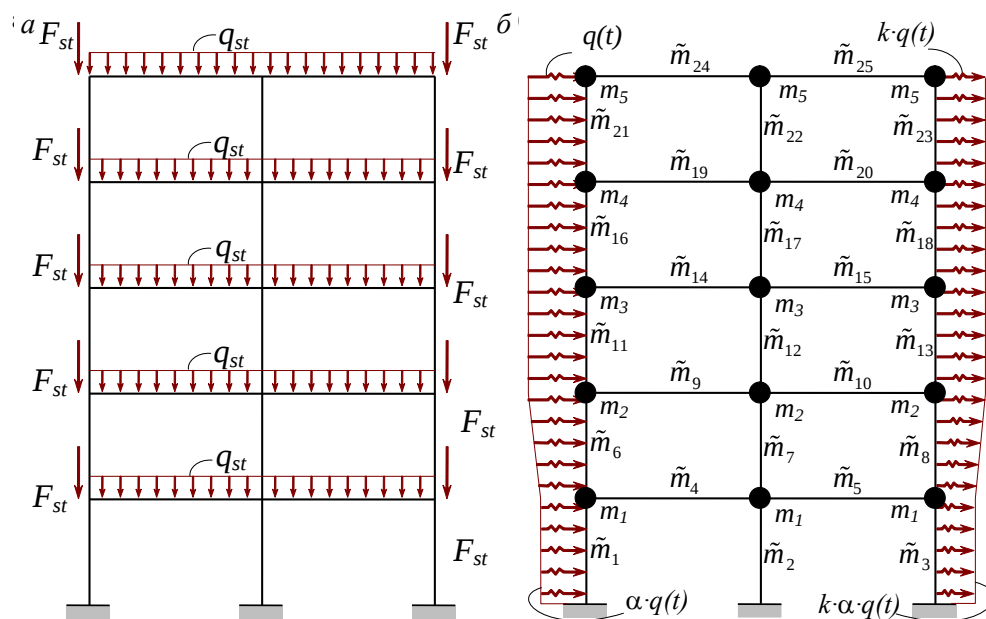


Рис. 1. Расчётная схема рамы:

а – статические воздействия; б – импульсные воздействия и расположение масс

В задаче рассмотрены статические нагрузки $q_{j,st}$ и $F_{st,j}$ и динамические импульсные нагрузки $q(t)$.

Выражения распределённых статических нагрузок $q_{j,st}$ для стоек имеют вид

$$q_{j,st} = \tilde{m}_j g, \quad j = 5 \cdot k + 1, 5 \cdot k + 2, 5 \cdot k + 3, \quad k = 0 \dots 4, \quad (7)$$

а для ригелей

$$q_{j,st} = \tilde{m}_j g + q_{st,uf}, \quad j = 5 \cdot k + 4, 5 \cdot k + 5, \quad k = 0 \dots 4, \quad (8)$$

где $\tilde{m}_j = \rho_j \cdot A_j$ – погонная масса j -го элемента, определяемая плотностью ρ_j материала и площадью сечения A_j элемента; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; $q_{st,uf}$ – статическая нагрузка от веса плит перекрытий и полезная нагрузка на них.

Выражения узловых статических нагрузок для средних узлов имеют вид

$$F_{st,j} = m_j g, \quad j = 2, 4, 6, 8, 10, \quad (9)$$

а для крайних узлов

$$F_{st,j} = m_j g + F_{st,w}, \quad j = 1, 3, 5, 7, 9, \quad (10)$$

где m_j – сосредоточенная масса в j -м узле; $F_{st,w}$ – вес наружных стен.

Заданными нагрузками являются статические $F_{st,w} = 33$ кН, $q_{st,uf} = 51,6$ кН/м и импульсная нагрузка $q(t) = q_0 \sin(2\pi \cdot t / T)$, $t \in [0; T]$, $T = 0,2$ с – длительность импульсного воздействия, $q_0 = 7,6105$ кН/м.

Коэффициенты $\alpha = 0,625$, $k = 0,8421$, указанные на рис. 1, б, определяют пропорции импульсной нагрузки по высоте рамы и её снижение с противоположной стороны (со стороны отрицательного давления).

На рис. 2, а показана форма сечения j -го элемента рамы. Размеры сечений элементов определяются соответствующими им параметрами δ_j , которые, в свою очередь, определяются варьируемыми параметрами X_1, X_2 :

$$\delta_j = X_1, \quad j = 5 \cdot k + 1, 5 \cdot k + 2, 5 \cdot k + 3, \quad k = 0 \dots 4 \text{ (колонны)}, \quad (11)$$

$$\delta_j = X_2, \quad j = 5 \cdot k + 4, 5 \cdot k + 5, \quad k = 0 \dots 4 \text{ (ригели)}. \quad (12)$$

Дополнительные узловые массы определяются варьируемыми параметрами $X_3 - X_7$:

$$m_j = X_{j+2}, \quad j = 1 \dots 5. \quad (13)$$

На рис. 2, б показана форма импульса во времени.

Поставлены задачи определения оптимальных параметров, характеризующих размеры сечений элементов и узловых дополнительных масс.

Для упрощения задачи и с целью более яркого выявления степени влияния варьируемых параметров дополнительных узловых масс все элементы разделены на две группы ОЭ: колонны и ригели. Принято пять поэтажных варьируемых параметров дополнительных масс и два параметра сечений. Учитываются только ограничения по прочности. Ниже приведены результаты решения поставленных задач оптимизации.

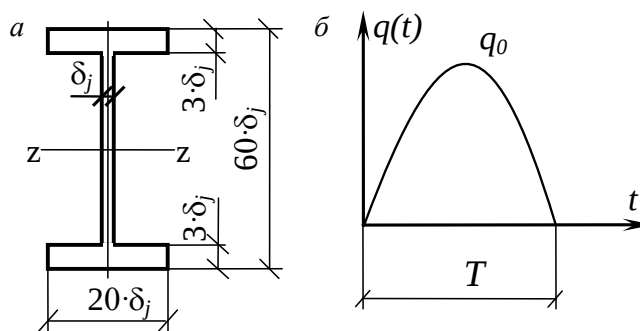


Рис. 2. Форма сечения (а); форма импульса (б)

Результаты решения задачи оптимизации при полном наборе варьируемых параметров (ВП), т. е. $NX = NGE + dm$, где NX – общее число ВП; NGE – число варьируемых параметров сечений; dm – число дополнительных масс. Получены следующие оптимальные значения параметров сечений 25 элементов рамы:

$X_1 = 0,00498$ м (колонны); $X_2 = 0,00436$ м (ригели).

Оптимальные значения ВП дополнительных масс:

$X_3 = 1,792$ т, $X_4 = 10$ т, $X_5 = 9,705$ т, $X_6 = 10$ т, $X_7 = 10$ т,

$OF_2(X) = 0,3591$ м³, число перерасчётов $krs = 1229$.

Результаты поиска оптимального решения в 2-этапном процессе

Итерация 1

Этап 1

Параметры размеров элементов фиксированы: $X_1 = X_2 = 0,007$ м. Варьируются дополнительные массы. Результаты поиска:

$X_3 = 0,0132$ т, $X_4 = 9,63$ т, $X_5 = 0,00423$ т, $X_6 = 9,99$ т, $X_7 = 10$ т.

Этап 2

Варьируются параметры размеров элементов, а значения дополнительных масс фиксированы (соответствуют результатам предыдущего этапа).

Результаты поиска:

$X_1 = 0,000449$ м, $X_2 = 0,00495$ м, $OF_2(X) = 0,3710$ м³.

Для выполнения критерия (6) завершения поиска потребовалось три итерации. Результаты по второму этапу третьей итерации:

$X_1 = 0,00478$ м, $X_2 = 0,00459$ м, $X_3 = 0,00869$ т,

$X_4 = 0,916$ т, $X_5 = 0,00419$ т, $X_6 = 9,99$ т, $X_7 = 10$ т,

$OF_2(X) = 0,3622$ м³, общее число перерасчётов по всем трём итерациям $krs = 336$.

Для оценки влияния дополнительных масс на расход материала элементов была решена задача поиска оптимального решения при отсутствии дополнительных масс. Результаты поиска:

$X_1 = 0,00638$ м, $X_2 = 0,00554$ м, $OF_2(X) = 0,5641$ м³.

Основные выводы

1. Решение задачи оптимизации объема материала рамы при полном наборе варьируемых параметров (семь параметров) сходится медленно (общее число перерасчётов $krs = 1229$), т. к. вектор ВП содержит параметры разной природы: дополнительные массы и параметры сечений элементов. Причём особенность варьируемых параметров дополнительных масс заключается в отсутствии их прямого влияния на целевую функцию (объём материала элементов). Это влияние определялось косвенно, через ограничения по прочности.

2. Проблема совместимости ВП разных групп может быть решена путем разделения общей задачи поиска оптимального решения на два этапа в процессе итераций с формированием и решением на каждом из этапов отдельной задачи оптимизации (общее число перерасчётов в таком случае составило $krs = 336$).

3. Задача оптимизации рамы решалась в наиболее простом варианте – две группы ОЭ (колонны, ригели), два ВП сечений и пять ВП дополнительных масс. Эффект от использования дополнительных масс, в плане снижения расхода материала элементов, составил 13,04 %. При этом значительно снижается трудоёмкость решения с точки зрения числа перерасчётов НДС системы.

Конечно, в реальных случаях число различных вариантов нагружения может быть значительным, и эффект использования дополнительных масс может существенно понизиться при окончательном выборе итогового варианта ДМ в наиболее неблагоприятном (для выбранного варианта ДМ) случае нагружения. Но и в этом случае он будет существенным, т. к. добавление массы в любом случае повышает инерционность системы, что при импульсном воздействии приводит к снижению значений параметров НДС системы.

4. Решение рассмотренной задачи оптимизации при импульсном воздействии проводилось с учетом собственных масс конструкции. Это сглаживает общий результат при заданном диапазоне дополнительных масс. Задание диапазона величин ДМ приближает поставленную задачу ОК к реальным условиям.

Библиографический список

1. Себешев В.Г., Гербер Ю.А. Регулирование с помощью динамических гасителей колебаний напряженно-деформированного состояния систем с конечным числом степеней свободы при гармонических воздействиях (решение в перемещениях масс с матрицей жесткости) // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 6 (750). С. 5–19.
2. Себешев В.Г., Гербер Ю.А. Регулирование динамическими гасителями колебаний напряженно-деформированного состояния и надежности систем с сосредоточенными массами при гармонических воздействиях // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 9 (729). С. 5–18.
3. Авторское свидетельство № 151532 А1 СССР, МПК F16F 15/03. Устройство для гашения колебаний механических систем : № 727324/25-8 : заявлено 22.04.1961 : опубликовано 31.10.1962 / Корнев Б.Г., Шейнин И.С.
4. Авторское свидетельство № 545732 А1 СССР, МПК F16F 15/02, E04B 1/98. Устройство для гашения колебаний высотных сооружений типа мачт и дымовых труб : № 2070554 : заявлено 11.10.1974 : опубликовано 05.02.1977 / Корнев Б.Г., Сысоев В.И. ; заявитель Ордена трудового красного знамени центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко.

5. Амбриашвили Ю.К., Ананьин А.И., Барченков А.Г. и др. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций : справочник проектировщика. Москва : Стройиздат, 1986. 461 с.
6. Сергеев Н.Д., Богатырев А.Н. Проблемы оптимального проектирования конструкций. Москва : Стройиздат, 1971. 136 с.
7. Рейтман М.И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел. Москва : Наука, 1976. 266 с.
8. Feng T.T., Arora J.S., Hanq E.J. Optimum Structural Design Under Dynamic Loads // Int. j. Numerical Methods in Ing. 1977. V. 11. № 1. P. 39–52.
9. Belsare S.V., Arora J.S. An algorithm for Engeneering design Optimization // Int. jomal for Numer. Meth in Engeneer. 1983. V. 19. P. 841–858.
10. Schmit L.A. Stuctural Optimization. Some Key Ideas and Insights. In: New Directions in Optimum structures Design / Ed. Atreck et Al. Cichester : Wiley, 1984. P. 1–45.
11. Хог Э., Аропа Я. Прикладное и оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции. Москва : Мир, 1983. 478 с.
12. Лазарев И.Б. Основы оптимального проектирования конструкций. Задачи и методы. Новосибирск : СГУПС, 1995. 295 с.
13. Ляхович Л.С., Малиновский А.П. Оптимизация по несущей способности и частоте колебаний // Проектирование конструкций в Красноярском крае. 1979. № 12. С. 103–113.
14. Ляхович Л.С., Платохин А.Н. Оптимизация жесткостей упругих связей при ограничении на величину первой частоты собственных колебаний // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1986. № 7. С. 26–29.
15. Гребенюк Г.И., Роев В.И., Вешкин М.С. Оптимизация стержневых систем при действии импульсных нагрузок // Проблемы оптимального проектирования сооружений : доклады IV Всероссийского семинара. Новосибирск : НГАСУ(Сибстрин), 2002. С. 108–118.
16. Гребенюк Г.И., Вешкин М.С. Дискретные модели расчета и оптимизации стержневых конструкций при импульсном нагружении // Известия Алтайского ГУ. 2012. № 1 1 (73). С. 36–38.
17. Гребенюк Г.И., Вешкин М.С. Разработка алгоритмов численного расчёта и оптимизации стержневых систем при действии импульсных нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 106–116.
18. Дмитриева Т.Л. Построение явных задач оптимизации конструкций, подверженных действию импульсных нагрузок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 7 (78). С. 12–18.
19. Дмитриева Т.Л. Параметрическая оптимизация в проектировании конструкций, подверженных статическому и динамическому воздействию. Иркутск : Иркутский государственный технический университет, 2010. 175 с.

REFERENCES

1. Sebeshev V.G., Gerber Yu.A. Regulirovanie s pomoshch'yu dinamicheskikh gasitelei kolebanii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem s konechnym chislom stepenei svobody pri garmonicheskikh vozdeistviyakh (reshenie v peremeshcheniyakh mass s matritsei zhestkosti) [Dynamic vibration dampers for stress-strain state of systems with finite number of degrees of freedom with harmonics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2021. No. 6 (750). Pp. 5–19. (rus)
2. Sebeshev V.G., Gerber Yu.A. Regulirovanie dinamicheskimi gasitelyami kolebanii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i nadezhnosti sistem s sosredotochennymi massami pri garmonicheskikh vozdeistviyakh [Dynamic vibration dampers for stress-strain state and reliability of systems with concentrated masses with harmonics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2019. No. 9 (729). Pp. 5–18. (rus)
3. Korenev B.G., Sheinin I.S. Author's Certificate N 151532 A1 SSSR, MPK F16F 15/03. *Ustroistvo dlya gasheniya kolebanii mekhanicheskikh sistem* [Device for vibration damping in mechanical systems]. 1962. (rus)

4. Korenev B.G., Sysoev V.I. Author's Certificate N 545732 A1 SSSR, MPK F16F 15/02, E04B 1/98. Ustroistvo dlya gasheniya kolebaniy vysotnykh sooruzhenii tipa macth i dymovykh trub [Device for vibration damping in high-rise structures such as masts and chimneys]. 1977. (rus)
5. Ambriashvili Yu.K., Anan'in A.I., Barchenkov A.G., et al. Dinamicheskii raschet spetsial'nykh inzhenernykh sooruzhenii i konstruktssii: spravochnik proektirovshchika [Dynamic analysis of special engineering structures: A designer's handbook]. Moscow: Stroiizdat, 1986. 461 p. (rus)
6. Sergeev N.D., Bogatyrev A.N. Problemy optimal'nogo proektirovaniya konstruktssii [Optimum structural design]. Moscow: Stroiizdat, 1971. 136 p. (rus)
7. Reitman M.I., Shapiro G.S. Metody optimal'nogo proektirovaniya deformiruemykh tel [Optimum design of deformable bodies]. Moscow: Nauka, 1976. (rus)
8. Feng T.T., Arora J.S., Hang E.J. Optimum structural design under dynamic loads. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1977. V. 11. No. 1. Pp. 39–52.
9. Belsare S.V., Arora J.S. An algorithm for engineering design optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1983. V. 19. P. 841–858.
10. Schmit L.A. Structural optimization. Some key ideas and insights. In: New directions in optimum structures design, Atrekk, Ed., Chichester: Wiley-Blackwell, 1984. Pp. 1–45.
11. Khog E., Arora Ya. Prikladnoe i optimal'noe proektirovanie. Mekhanicheskie sistemy i konstruktssii [Applied and optimum design. Mechanical systems and structures]. Moscow: Mir, 1983. 478 p. (rus)
12. Lazarev I.B. Osnovy optimal'nogo proektirovaniya konstruktssii. Zadachi i metody [Fundamentals of optimum design of structures. Tasks and methods]. Novosibirsk, 1995. 295 p. (rus)
13. Lyakhovich L.S., Malinovskii A.P. Optimizatsiya po nesushchei sposobnosti i chastote kolebaniy [Optimization of bearing capacity and vibration frequency]. *Proektirovanie konstruktssii v Krasnoyarskom krae*. 1979. No. 12. Pp. 103–113. (rus)
14. Lyakhovich L.S., Platokhin A.N. Optimizatsiya zhestkosti uprugikh svyazei pri ogranichenii na velichinu pervoi chastoty sobstvennykh kolebaniy [Optimization of elastic bond stiffnesses with limitation by the first frequency of natural oscillations]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1986. No. 7. Pp. 26–29. (rus)
15. Grebenyuk G.I., Roev V.I., Veshkin M.S. Optimizatsiya sterzhnevnykh sistem pri deistvii impul'snykh nagruzok [Optimization of rod systems under pulse loading]. In: Problemy optimal'nogo proektirovaniya sooruzhenii: doklady 4-go Vserossiiskogo seminara (*Dokl. All Russ. Seminar 'Problems of Optimum Structural Design'*). Novosibirsk, 2002. Pp. 108–118. (rus)
16. Grebenyuk G.I., Veshkin M.S. Diskretnye modeli rascheta i optimizatsii sterzhnevnykh konstruktssii pri impul'snom nagruzhении [Discrete models for calculation and optimization of rod structures under pulse loading]. *Izvestiya Altaiskogo GU*. 2012. No. 1 1 (73). Pp. 36–38. (rus)
17. Grebenyuk G.I., Veshkin M.S. Razrabotka algoritmov chislennogo rascheta i optimizatsii sterzhnevnykh sistem pri deistvii impul'snykh nagruzok [Development of algorithms for numerical calculation and optimization of rod systems under pulse loading]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4 (45). Pp. 106–116. (rus)
18. Dmitrieva T.L. Postroenie yavnykh zadach optimizatsii konstruktssii, podverzhennykh deistviyu impul'snykh nagruzok [Structural optimization under pulse loads]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. No. 7 (78). Pp. 12–18. (rus)
19. Dmitrieva T.L. Parametricheskaya optimizatsiya v proektirovanii konstruktssii, podverzhennykh staticheskomu i dinamicheskomu vozdeistviyu [Parametric optimization in structural design under static and dynamic loads]. Irkutsk, 2010. 175 p. (rus)

Сведения об авторах

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

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

Вешкин Максим Сергеевич, ст. преподаватель, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, max.vs@list.ru

Authors Details

Grigori I. Grebenyuk, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solanaya Str., 634002, Tomsk, Russia, greb@sibstrin.ru

Vitali I. Maksak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solanaya Str., 634002, Tomsk, Russia.

Maksim S. Veshkin, Senior Lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, max.vs@list.ru1

УДК 624.012.042.8.001.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97

*О.Г. КУМПЯК, Д.Р. ГАЛЯУТДИНОВ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

МЕТОД РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С РАСПОРОМ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

Аннотация. При проектировании железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении в сооружении необходимо учитывать возникновение реакции распора. Наличие распора приводит к значительному увеличению прочности и снижению деформативности конструкций, как и при применении податливых опор за счет их энергоемкости.

Целью теоретического исследования является разработка метода расчета и изучение целесообразности применения податливых опор в распорных динамически нагруженных конструкциях.

В работе представлены результаты численного расчета железобетонных балочных конструкций с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении на основе разработанного метода расчета. Рассмотрено совместное влияние податливых опор и распора на коэффициент динамичности железобетонных конструкций. Результаты теоретических исследований свидетельствуют о положительном эффекте применения податливых опор и учета реакции распора в динамически нагруженных конструкциях.

Ключевые слова: метод расчета, условно-упругая стадия, упругопластическая стадия, железобетонная балка, коэффициент динамичности, податливая опора, распор, кратковременная динамическая нагрузка

Для цитирования: Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р. Метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 81–97.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97

*O.G. KUMPYAK, D.R. GALYAUTDINOV,**Tomsk State University of Architecture and Building*

NUMERICAL CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH SPACING ON COMPLIANT SUPPORTS UNDER DYNAMIC LOAD

Abstract. In design of reinforced concrete beams on yielding supports under the dynamic load in a structure, it is necessary to consider the thrust reaction. The presence of a spacing leads to a significant increase in strength and a decrease in the structural deformability, as in the case

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90097.

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0004.

with yielding supports due to their energy intensity. The purpose of this paper is to develop the calculation method and study the feasibility of using yielding supports in the structure under the dynamic load. The paper presents the results of a numerical calculation of reinforced concrete beams with spacing on yielding supports under the dynamic load. The joint influence is considered for yielding supports and thrust on the dynamism of reinforced concrete structures. The theoretical results confirm the positive effect of using yielding supports with regard to the expansion effect in dynamically loaded structures.

Keywords: numerical calculation, elastic stage, elastoplastic stage, reinforced concrete beam, dynamic coefficient, yielding support, thrust, dynamic load

For citation: Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R. Metod rascheta zhelezobetonnykh balok s rasporom na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Numerical calculation of reinforced concrete beams with spacing on compliant supports under dynamic load]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 81–97.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97

Вопрос безопасности зданий и сооружений в последние десятилетия становится приоритетным в связи с террористической угрозой, а также возникновением бытовых, природных и производственных чрезвычайных ситуаций. Последствия данных ситуаций приводят к значительным материальным затратам на частичное или полное восстановление зданий или сооружений. Сооружения, проектируемые на особые динамические воздействия, часто возводятся из сборного и сборно-монолитного железобетона по рамной и рамно-связевой конструктивным схемам. На торцах изгибаемых элементов по ряду причин имеет место возникновение и развитие реакции распора вследствие ограничения горизонтального смещения.

Существующие экспериментально-теоретические исследования железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении отражены в работах отечественных [1, 2, 9–15] и зарубежных [16–19] ученых. Применение податливых опор свидетельствует об эффективности повышения сопротивления конструкций указанным воздействиям. При этом степень снижения динамической реакции определяется упругопластическими свойствами податливой опоры и соотношением жесткостей опоры и конструкции.

Исследования, посвященные учету реакции распора [3–8], показывают, что ограничение горизонтального смещения приводит к повышению несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций. При однократном кратковременном динамическом нагружении действие распора на работу конструкции неоднозначно. С одной стороны, действие распора повышает несущую способность конструкции, с другой – понижается ее деформативность. Снижение деформативности отрицательно сказывается на пластических свойствах железобетонной конструкции и часто приводит к уменьшению ее динамической прочности.

Целью теоретических исследований железобетонных балок с распором на податливых опорах является разработка метода расчета в условно-упругой и пластической стадиях деформирования изгибаемых элементов, а также

оценка совместного учета вертикальной и горизонтальной податливости конструкций на опорах.

В связи с особенностью развития распора метод сводится к пошаговому расчету, благодаря чему возможно на каждом шаге учитывать влияние изменения угла поворота конструкции и изменения реакции распора в процессе деформирования. Количество шагов назначается из условия снижения погрешности между полученными расчетными значениями перемещений.

Рассматриваются однопролетные железобетонные балки с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Динамическая нагрузка принимается равномерно распределенной по пролету. При расчете в условно-упругой и пластической областях использован приближенный метод, основанный на задании формы прогибов конструкции. Уравнение движения балки в условно-упругой и пластической стадии получаем на основе принципа возможных перемещений, т. е. из условия равенства нулю работ всех действующих сил на возможных перемещениях, т. е. $\sum A = 0$. При этом учитывается работа сил инерции (ma) и распора ($H(t)$) на соответствующих перемещениях.

Вариации прогиба (δy), кривизны балки ($\delta \chi$) и горизонтального смещения ($\delta \Delta$) примем равными:

$$\begin{aligned}\delta y &= \sin\left(\frac{\pi}{l}x\right), \\ \delta \chi &= -\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\pi^2}{l^2} \sin\left(\frac{\pi}{l}x\right), \\ \delta \Delta &= \varphi \cdot z, \quad \varphi = \frac{dF(x)}{dx} \text{ при } x=0,\end{aligned}\quad (1)$$

где φ – угол поворота конструкции на опоре ($x=0$); z – расстояние от оси, совпадающей с направлением действия распора до центра тяжести сжатой зоны бетона критического нормального сечения балки.

Величина распора $H_{j,s}^i(t)$ определяется следующим выражением:

$$H_{j,s}^i(t) = \Delta H_{j,s}^i(t) / c \leq H_{\max}, \quad (2)$$

где $\Delta H_{j,s}^i(t)$ – горизонтальное смещение на j -й стадии деформирования балки на текущем этапе расчета (s) при i -й стадии работы податливых опор во времени; c – горизонтальная податливость конструкции на опоре по направлению реакции распора; $H_{\max}$ – максимальная величина распора, обусловленная ограничивающей конструкцией; $j = el, pl$ – индекс, принимаемый в зависимости от стадии работы балки: условно-упругая (el), пластическая (pl); $i = el, pl, h$ – индекс, принимаемый в зависимости от стадии работы податливой опоры: упругая (el), пластическая (pl), стадия отвердения (h).

Для угла поворота балки справедлива следующая зависимость:

$$\varphi_{j,s}^i(t) = \frac{dy_{j,s}^i(x,t)}{dx} \text{ при } x=0. \quad (3)$$

Для прогиба балки примем функцию перемещения в виде

$$y_{j,s}^i(x,t) = pF(x)T_{j,s}^i(t) + u_{i,s}(t), \quad (4)$$

где $F(x)$ – функция распределения перемещений, обусловленная деформированием балки; $T_{j,s}^i(t)$ – функция динамичности; $u_{i,s}(t)$ – функция перемещений податливых опор.

Функцию $F(x)$ для шарнирно опертой балки, удовлетворяющую граничным условиям на концах балки, в зависимости от вида опорных соединений примем:

$$F(x) = \sin\left(\frac{\pi}{l}x\right). \quad (5)$$

Условно-упругая балка

При условно-упругом деформировании балки ($j = el$) уравнение работ действующих сил на возможных перемещениях запишется:

$$\int_0^l p(t)\delta y dx - \int_0^l M_{el,s}^i \delta \chi dx - 2H_{el,s}^i(t)\delta \Delta - \int_0^l m(\ddot{y}_{el,s}^i(x,t))\delta y dx = 0. \quad (6)$$

Подставив выражения (1) – (5) в (6), после преобразований получим уравнение движения балки с распором на податливых опорах в условно-упругой стадии

$$\frac{d^2}{dt^2} T_{el,s}^i(t) + \omega_{H,el}^2 T_{el,s}^i(t) = \omega_1^2 p(t), \quad (7)$$

где $\omega_{H,el} = \sqrt{\omega_1^2 + \frac{k}{1 + \frac{\pi^4}{2W_i}}}$ – частота колебаний балки с распором; $k = \frac{4\pi^2 z^2}{cm l^3}$ –

коэффициент, учитывающий податливость в горизонтальном направлении;

$\omega_1 = \frac{\omega}{\sqrt{1 + \frac{\pi^4}{2W_i}}}$ – частота колебания балки на податливых опорах; $\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{B}{m}}$ –

частота колебания балки на жестких опорах; B – жесткость конструкции с учетом трещин в бетоне; m – погонная масса конструкции; $p(t)$ закон изменения

нагрузки во времени; $W_i = \frac{g_i l^3}{B}$ – параметр, характеризующий соотношение

жесткостей балки и податливых опор; g_i – жесткость податливых опор в i -й стадии деформирования.

Изменение во времени в пределах шага расчета (s) описывается следующей зависимостью:

$$p(t) = p_1 - \frac{(p_1 - p_2)}{(t_2 - t_1)}(t - t_1) = p_1 - \Delta p(t - t_1), \quad (8)$$

где t – текущая координата времени; p_1, p_2 – значение нагрузки на рассматриваемом участке в начале и конце соответственно для расчетного шага (s); t_1, t_2 – значение времени на рассматриваемом участке в начале и конце соответственно.

Решение полученного уравнения (7) для принятого закона изменения нагрузки (8) имеет вид

$$T_{el,s}^i(t) = \sin(\omega_{H,el}t)A_{el,s}^i - \cos(\omega_{H,el}t)B_{el,s}^i - \frac{\omega_1(\Delta p(t - t_1) - p_1)}{\omega_{H,el}^2}. \quad (9)$$

Неизвестные константы $A_{el,s}^i$ и $B_{el,s}^i$ определяются исходя из начальных условий, т. е. равенства функции динамичности и ее первой производной значениям на предыдущем этапе расчета ($s-1$): $T_{el,s}^i(t) = T_{el,s-1}^i(t)$, $\dot{T}_{el,s}^i(t) = \dot{T}_{el,s-1}^i(t)$:

$$A_{el,s}^i = \frac{\omega_{H,el}^2 \dot{T}_{el,s}^i(t) + \omega_1^2 \Delta p}{\omega_{H,el}^3}, \quad B_{el,s}^i = \frac{\omega_{H,el}^2 T_{el,s}^i(t) - \omega_1^2 \Delta p}{\omega_{H,el}^2}. \quad (10)$$

Время достижения максимума $t_{\max}$ функцией динамичности $T_{el,s}^i(t)$ определяется из выражения $\dot{T}_{el,s}^i(t) = 0$.

Перемещения податливых опор в зависимости от стадии их деформирования для балок в условно-упругой стадии определяются выражениями:

– упругая $u_{el,s}^{el}(t) = \frac{pl}{2g_{el}} T_{el,s}^{el}(t);$

– упругопластическая

$$u_{el,s}^{pl}(t) = \frac{pl}{2g_{pl}} T_{el,s}^{pl}(t) + \left(1 - \frac{g_{el}}{g_{pl}}\right) u_{el}^{pl}(t_{SY,el});$$

– упругопластическая с отвердением

$$u_{el,s}^h(t) = \frac{pl}{2g_h} T_{el,s}^h(t) + \left(1 - \frac{g_{pl} - g_{el}}{g_h}\right) u_{el}^{el}(t_{SY,el}) + \left(1 - \frac{g_{pl}}{g_h}\right) u_{el}^{pl}(t_{SY,pl}).$$

Балка в пластической стадии

Деформирование балки в пластической стадии происходит при достижении напряжениями в арматуре предела текучести (физического или условного) и сопровождается резким снижением жесткости конструкции. Условие перехода балки в пластическую стадию имеет вид $M > M_{el} = M_{el,s}^i(t_{el})$, где M_{el} – изгибающий момент, соответствующий концу условно-упругой стадии; t_{el} – время конца условно-упругой стадии деформирования балки.

При расчете балки в пластической стадии применяется метод стационарных пластических зон, когда пластические деформации считаются развивающимися в пределах постоянной длины l_{pl} (рис. 1, а). Участки балки Δ , примыкающие к пластической зоне l_{pl} , считаются жесткими дисками.

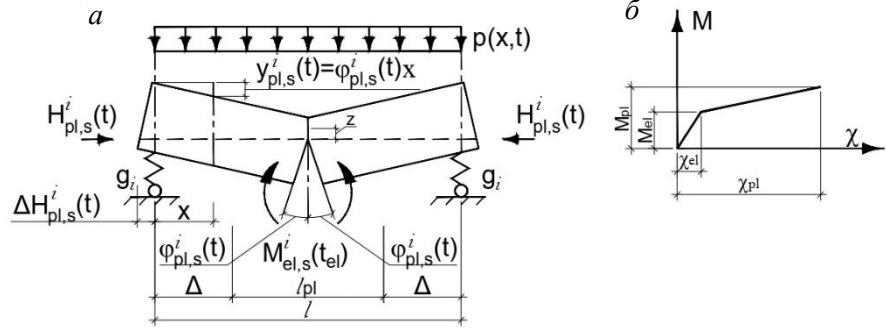


Рис. 1. Расчетная схема упругопластической балки с распором на податливых опорах (а) и диаграмма деформирования балки (б)

При пластическом деформировании балки ($j = pl$) справедливо выражение $M_{pl,s}^i = M_{el} + B_{pl}(\chi - \chi_{el})$, и уравнение движения балки примет вид:

$$\int_0^l p(t) \delta y dx - \int_0^{l-\Delta} M_{pl,s}^i \delta \chi dx - 2H_{pl,s}^i(t) \delta \Delta - \int_0^l m(\ddot{y}_{pl,s}^i(x,t)) \delta y dx = 0. \quad (11)$$

После преобразований с учетом выражений (1) – (5) получим уравнение движения железобетонной балки с распором в пластической стадии на податливых опорах:

$$\frac{d^2}{dt^2} T_{pl,s}^i(t) + \omega_{H,pl}^2 T_{pl,s}^i(t) = \omega_3^2 (p(t) - k_{M1}), \quad (12)$$

$$\text{где } \omega_{H,pl} = \sqrt{\omega_4^2 + \frac{k}{1 + \frac{\pi^4 \beta_2}{2 W_i}}}; \quad \omega_3 = \frac{\omega}{\sqrt{1 + \frac{\pi^4 \beta_2}{2 W_i}}}; \quad \omega_4 = \frac{\omega_2}{\sqrt{1 + \frac{\pi^4 \beta_2}{2 W_i}}}; \quad \beta_2 = \frac{\omega_2^2}{\omega^2};$$

$$\omega_2 = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{B_{pl}}{m} \left(1 - \frac{2\Delta}{l} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi\Delta}{l}\right) \right)}; \quad k_{M1} = \frac{\pi^2}{pl^2} M_{el} \left(1 - \frac{B_{pl}}{B_{el}} \right) \cos\left(\frac{\pi\Delta}{l}\right).$$

Решение полученного уравнения (12) для принятого закона изменения нагрузки $p(t) = p_1 - \Delta p(t_2 - t_1)$ имеет вид

$$T_{pl,s}^i(t) = \sin(\omega_{H,pl} t) A_{pl,s}^i - \cos(\omega_{H,pl} t) B_{pl,s}^i - \frac{\omega_1 (\Delta p(t - t_1) - p_1 - k_{M1})}{\omega_{H,pl}^2}. \quad (13)$$

Неизвестные константы $A_{pl,s}^i$ и $B_{pl,s}^i$ определяются исходя из начальных условий, т. е. равенства функции динамичности и ее первой производной значениям на предыдущем этапе расчета (s-1): $T_{pl,s}^i(t) = T_{pl,s-1}^i(t)$, $\dot{T}_{pl,s}^i(t) = \dot{T}_{pl,s-1}^i(t)$:

$$A_{pl,s}^i = \frac{\omega_{H,pl}^2 \dot{T}_{pl,s}^i(t) + \omega_3^2 \Delta p}{\omega_{H,pl}^3}, B_{pl,s}^i = \frac{\omega_{H,pl}^2 T_{pl,s}^i(t) - \omega_3^2 (p_1 + k_{M1})}{\omega_{H,pl}^2}. \quad (14)$$

Время достижения максимума $t_{\max}$ функцией динамичности $T_{pl,s}^i(t)$ определяется из выражения $\dot{T}_{pl,s}^i(t) = 0$.

Перемещения податливых опор в зависимости от стадии их деформирования для балок в пластической стадии определяются выражениями:

– упругая $u_{pl,s}^{el}(t) = \frac{pl}{2g_{el}} (\beta_2 T_{pl,s}^{el}(t) + k_{M1});$

– упругопластическая

$$u_{pl,s}^{pl}(t) = \frac{pl}{2g_{pl}} \left(\beta_2 T_{pl,s}^{el}(t) + k_{M1} + u_{pl}^{pl}(t_{SY,el}) \left(1 - \frac{g_{el}}{g_{pl}} \right) \right);$$

– упругопластическая с отвердением

$$u_{el,s}^h(t) = \frac{pl}{2g_h} \left(\beta_2 T_{pl,s}^h(t) + k_{M1} + u_{pl}^{pl}(t_{SY,pl}) \left(1 - \frac{g_{pl}}{g_h} \right) \right).$$

Для реализации метода расчета железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении на податливых опорах разработан алгоритм (рис. 2), реализованный на языке программирования Maple. Алгоритм позволяет вычислить функцию и коэффициент динамичности при любой произвольной кратковременной динамической нагрузке, представленной кусочно-линейной аппроксимацией (рис. 3).

Первоначально задаются исходные данные, которые включают в себя: геометрию и армирование железобетонных балок; физико-механические характеристики арматуры, бетона, податливых опор; податливость распорной конструкции; параметры кратковременной динамической нагрузки и частоту разбивки как на этапе действия нагрузки ($p > 0$), так и при ее отсутствии ($p = 0$).

Алгоритм представляет собой циклический метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении до момента достижения максимума функцией динамичности, т. е. получения коэффициента динамичности $k_d = T_{j,s}^i(t_{\max})$. В пределах цикла счета определяется функция динамичности железобетонной балки на податливых опорах с учетом изменения величины реакции распора вследствие поворота балки на опорах.

Результатом вычисления являются прогибы, внутренние усилия, величина коэффициента динамичности $k_d = T_{j,s}^i(t_{\max})$, а также и массив данных, представляющих функцию динамичности $T_{j,s}^i(t)$ во времени, импортированную в таблично-графическую среду MS Excel. Разработанный метод позволяет рассчитывать железобетонные балки на податливых опорах с распором при кратковременном динамическом нагружении, также балки на жестких опорах

без распора ($W_i = \infty, c = \infty$), на жестких опорах с распором ($W_i = \infty$), на податливых опорах без распора ($c = \infty$).

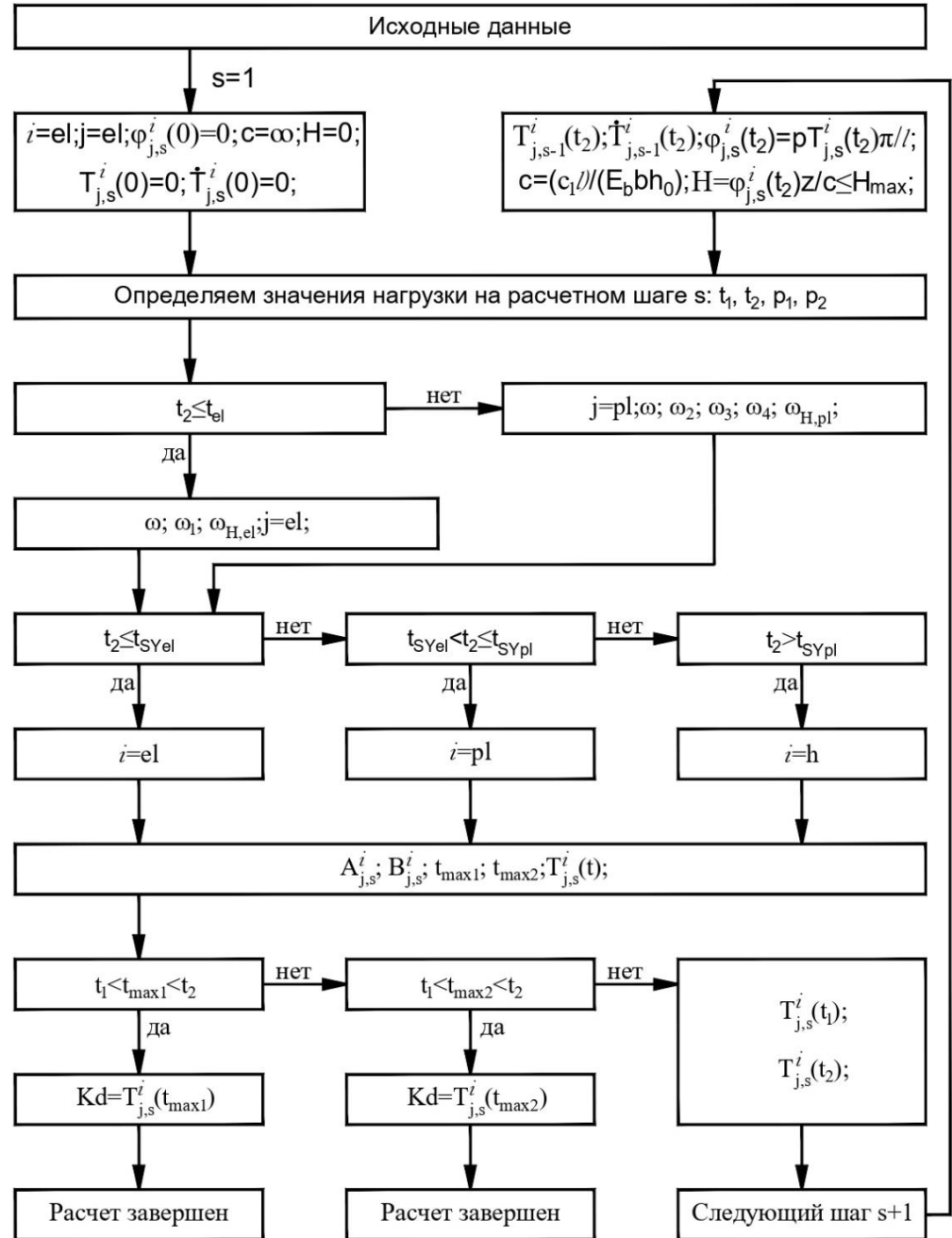


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении

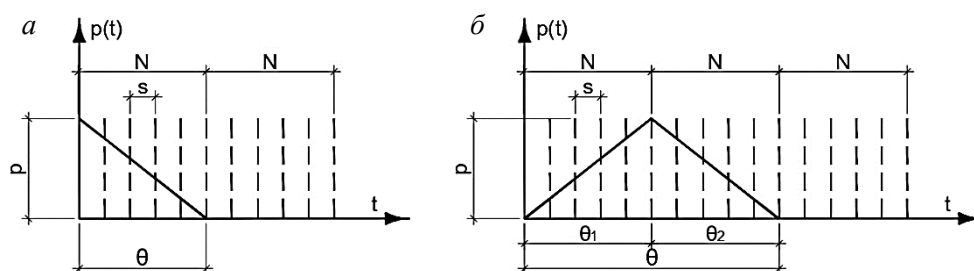


Рис. 3. Схема представления расчетного закона для кратковременной динамической нагрузки: мгновенно нарастающая с убыванием по линейному закону (а); постепенно нарастающая (б)

С целью оценки влияния распора на прочность железобетонных балок как на жестких, так и на податливых опорах $i = el$ при кратковременном динамическом нагружении, проведены численные исследования с использованием разработанного метода расчета. Деформирование железобетонных балок рассмотрено в условно-упругой ($j = el$) и упругопластической ($j = el...pl$) стадиях.

При условно-упругом деформировании основным параметром является максимальное значение функции динамичности $T(t)$, т. е. коэффициент динамичности (k_d – на жестких опорах; $k_{d,H}$ – на жестких опорах с распором; $k_{d,SY}$ – на податливых опорах; $k_{d,HSY}$ – на податливых опорах с распором).

Оценка распора выполнялась по величине c_1 , которая физически является соотношением продольной жесткости балки к жесткости конструкции, препятствующей горизонтальному смещению, и определяется зависимостью $c_1 = cE_b b h_0 / l$.

При действии мгновенно нарастающей нагрузки снижение $\omega\theta$ приводит к уменьшению коэффициента динамичности k_d (рис. 4). Эффективность реакции распора (c_1) для балок на жестких опорах (рис. 4, б) возрастает с увеличением $\omega\theta$. Максимально возможное снижение $k_{d,H}$ на 40 % – при $c_1 = 1$. С увеличением коэффициента c_1 эффективность снижается, так при $c_1 = 10$ происходит максимальное снижение коэффициента динамичности $k_{d,H}$ на 7 %. Применение податливых опор при $W_{el} = 1-100$, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента динамичности как для балок с распором ($k_{d,HSY}$), так и без распора ($k_{d,SY}$), стоит отметить, что максимальное снижение наблюдается при минимальном значении $\omega\theta$.

При действии постепенно нарастающей нагрузки (рис. 5) коэффициент динамичности как для балок с распором $k_{d,H}$, так и без распора k_d (рис. 5, а – линия 1; б – $c_1 = \infty$) принимает предельные значения в интервале $\omega\theta_1 = 0-5$. Наличие распора ($c_1 = 1$) приводит к снижению максимального значения $k_{d,H}$ до 0,9, что ниже на 40 % по отношению к балке на жестких опорах.

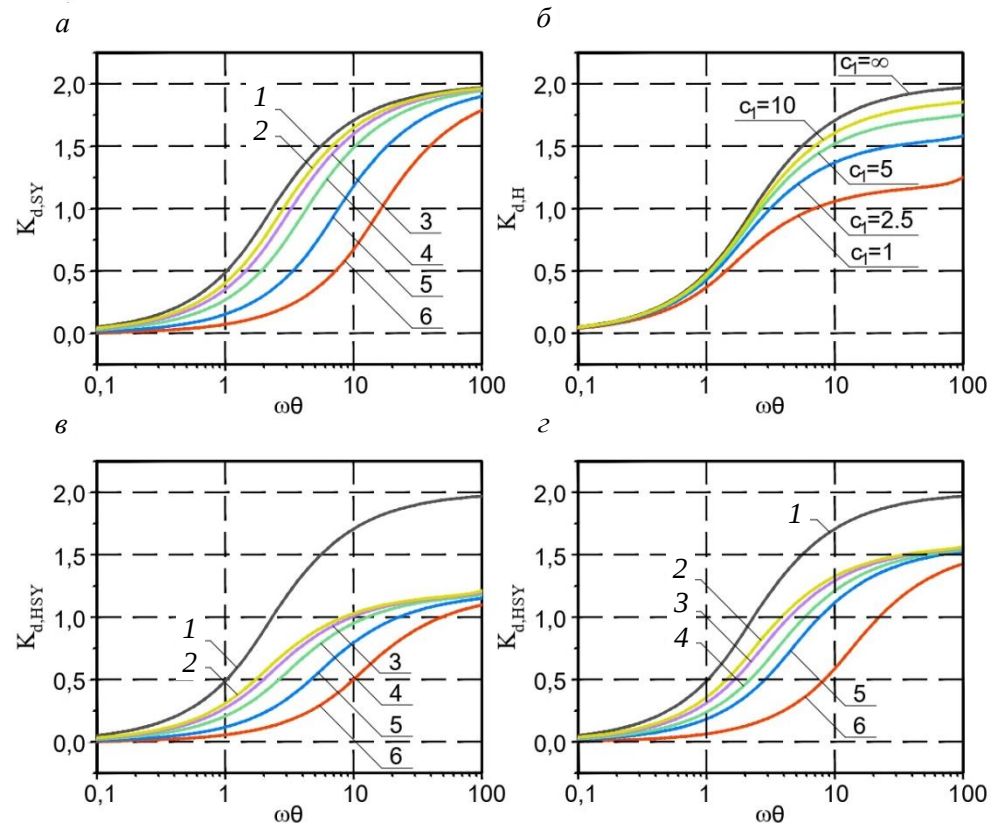


Рис. 4. Коэффициент динамичности условно-упругой балки для мгновенно нарастающей нагрузки на податливых опорах $k_{d,SY}$ (а) [2]; на жестких опорах с распором $K_{d,H}$ (б); на податливых опорах с распором $K_{d,HSY}$ при $c_1 = 1$ (в); на податливых опорах с распором $K_{d,HSY}$ при $c_1 = 2,5$ (г): жесткие опоры (1); податливые опоры $W_{el} = 100$ (2); податливые опоры $W_{el} = 50$ (3); податливые опоры $W_{el} = 20$ (4); податливые опоры $W_{el} = 5$ (5); податливые опоры $W_{el} = 1$ (6)

Применение податливых опор постоянной жесткости (W_{el}) приводит к снижению коэффициента динамичности не на всем диапазоне, т. к. происходит расширение интервала предельных значений для балок в условно-упругой стадии на жестких опорах с распором и без него (рис. 5). Из графика видно, что при $\omega\theta_1 = 5$ наблюдается снижение коэффициента динамичности $k_{d,SY}$ на податливых опорах ($W_{el} = 1$) на 85 %. В то же время при $\omega\theta_1 > 20$ происходит увеличение $k_{d,SY}$ на 50 %. При учете реакции распора ($c_1 = 1$) и использовании податливых опор $W_{el} = 1$ снижение коэффициента динамичности $k_{d,HSY}$ наблюдается на всем диапазоне $\omega\theta_1$ относительно балок на жестких опорах. Эффективность совместного влияния вертикальной и горизонтальной податливости увеличивается с возрастанием $\omega\theta_1$.

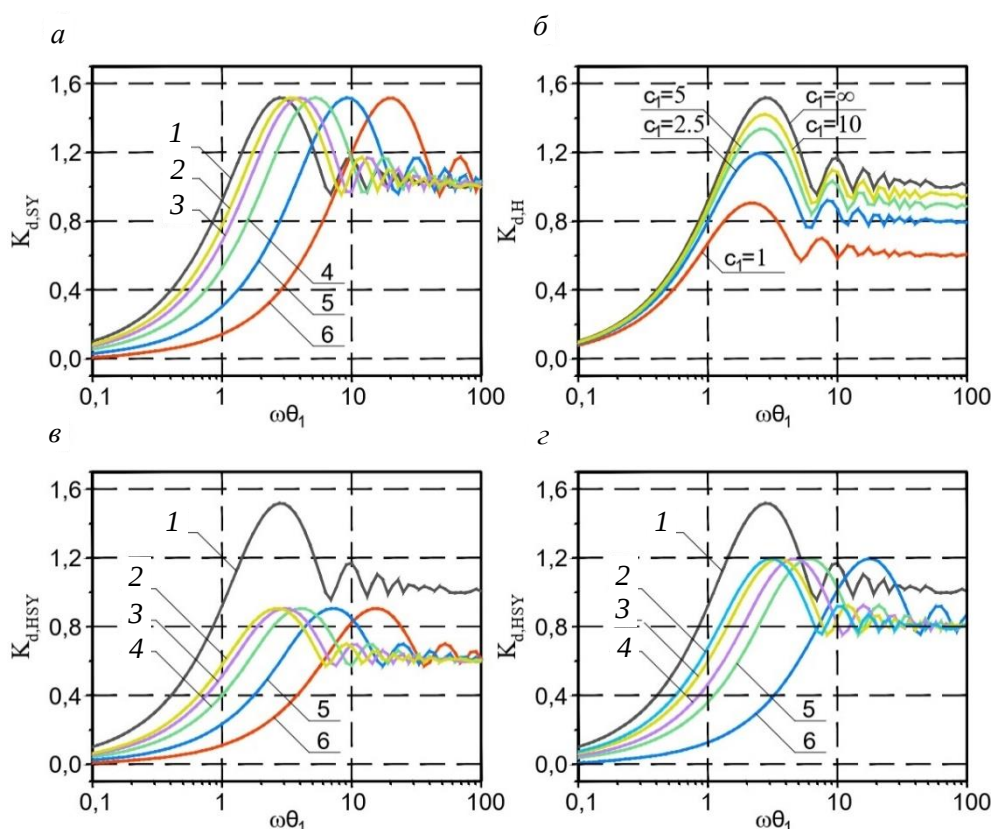


Рис. 5. Коэффициент динамичности условно-упругой балки для постепенно нарастающей нагрузки на податливых опорах $k_{d,SY}$ (а) [2]; на жестких опорах с распором $K_{d,H}$ (б); на податливых опорах с распором $K_{d,HSY}$ при $c_1 = 1$ (в); на податливых опорах с распором $K_{d,HSY}$ при $c_1 = 2,5$ (г); жесткие опоры (1); податливые опоры $W_{el} = 100$ (2); податливые опоры $W_{el} = 50$ (3); податливые опоры $W_{el} = 20$ (4); податливые опоры $W_{el} = 5$ (5); податливые опоры $W_{el} = 1$ (6)

Так как максимальная эффективность от снижения жесткости податливых опор достигается при минимальном $\omega\theta$, а наличие распора при максимальном $\omega\theta(\omega\theta_1)$, то данный факт должен учитываться при проектировании. Стоит отметить, что при рациональном подходе совместный учет реакции распора (c_1) и применения податливых опор (W_{el}) позволяет значительно снизить коэффициент динамичности для балок в условно-упругой стадии и при этом получить высокую эффективность от обоих факторов.

При упругопластической работе балок с распором на жестких опорах оценка производилась по отношению $k_{d,H} / k_d$ (рис. 6), на податливых опорах $k_{d,HSY} / k_d$ (рис. 7) при действии мгновенно и постепенно нарастающих кратковременных динамических нагрузок.

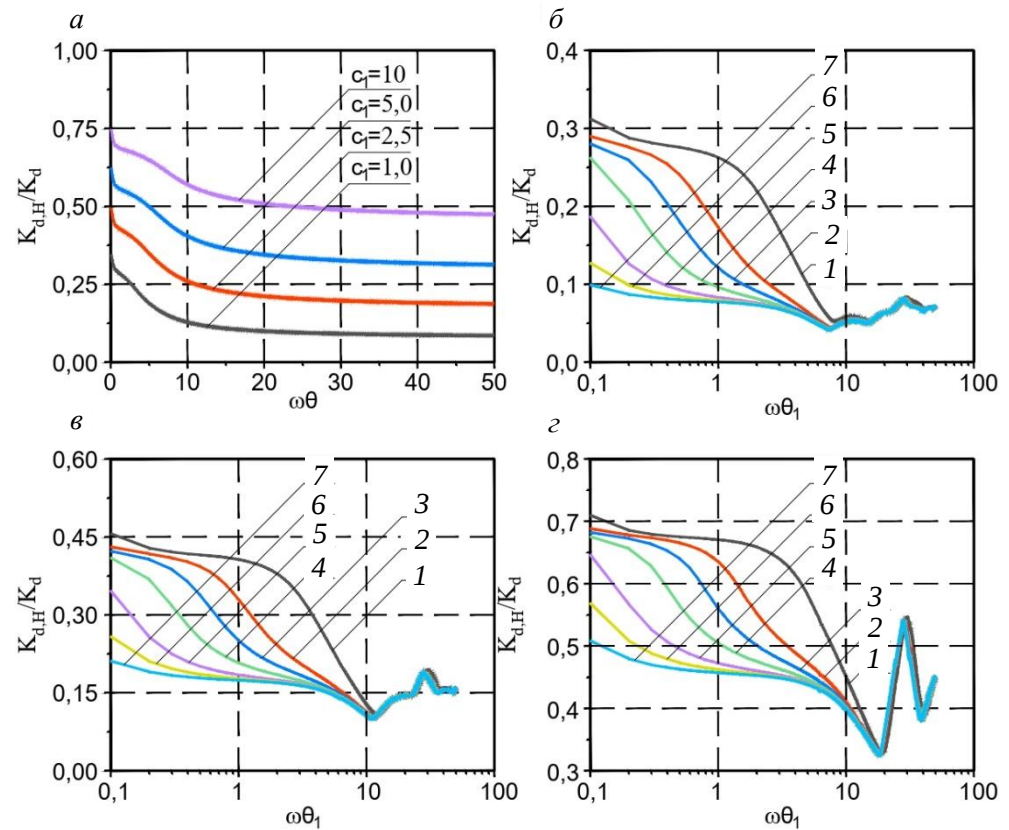


Рис. 6. Изменение $k_{d,H}/k_d$ зависимости от $t_{el}/t_{\max}$ для упругопластических железобетонных балок с распором ($c_1 = 1-10$) под действием мгновенно нарастающей нагрузки (а) и постепенно нарастающей нагрузки при $c_1 = 1$ (б); $c_1 = 2,5$ (в); $c_1 = 10$ (г): $\theta_2/\theta_1 = 1$ (1); $\theta_2/\theta_1 = 5$ (2); $\theta_2/\theta_1 = 10$ (3); $\theta_2/\theta_1 = 20$ (4); $\theta_2/\theta_1 = 50$ (5); $\theta_2/\theta_1 = 100$ (6)

Учет реакции распора в железобетонных балках приводит к значительному снижению коэффициента динамичности $k_{d,H}$, а именно положительному влиянию на всем диапазоне $\omega\theta(\omega\theta_1)$ как при мгновенно, так и постепенно нарастающих кратковременных динамических нагрузках. При упругопластическом деформировании балки эффективность распора выше, чем при условно-упругом (рис. 4, 5), что объясняется спецификой развития реакции распора за счет увеличения деформирования балки в пластической по сравнению с условно-упругой стадией. Максимальная эффективность распора достигается при $\omega\theta > 10$. С ростом отношения θ_2/θ_1 увеличивается коэффициент динамичности $k_{d,H}$ при равных соотношениях жесткости балки и опорного сечения (c_1). Наличие упругих податливых опор при упругопластическом деформировании балки без распора при постепенно нарастающей нагрузке (рис. 8) может носить как

положительный эффект ($k_{d,SY} / k_d < 1$), так и отрицательный ($k_{d,SY} / k_d > 1$), при мгновенно нарастающей положительный (рис. 7) эффект наблюдается на всем диапазоне $\omega\theta$. При совместном учете реакции распора ($c_1 = 1$) и упругой податливости опор (W_{el}) в диапазоне $\omega\theta(\omega\theta_1) = 1-100$ проявляется только положительный эффект. Со снижением влияния распора ($c_1 \rightarrow \infty$) развивается область отрицательного влияния, т. е. рост коэффициента динамичности $k_{d,HSY}$ на податливых опорах с распором относительно коэффициента динамичности на жестких опорах k_d .

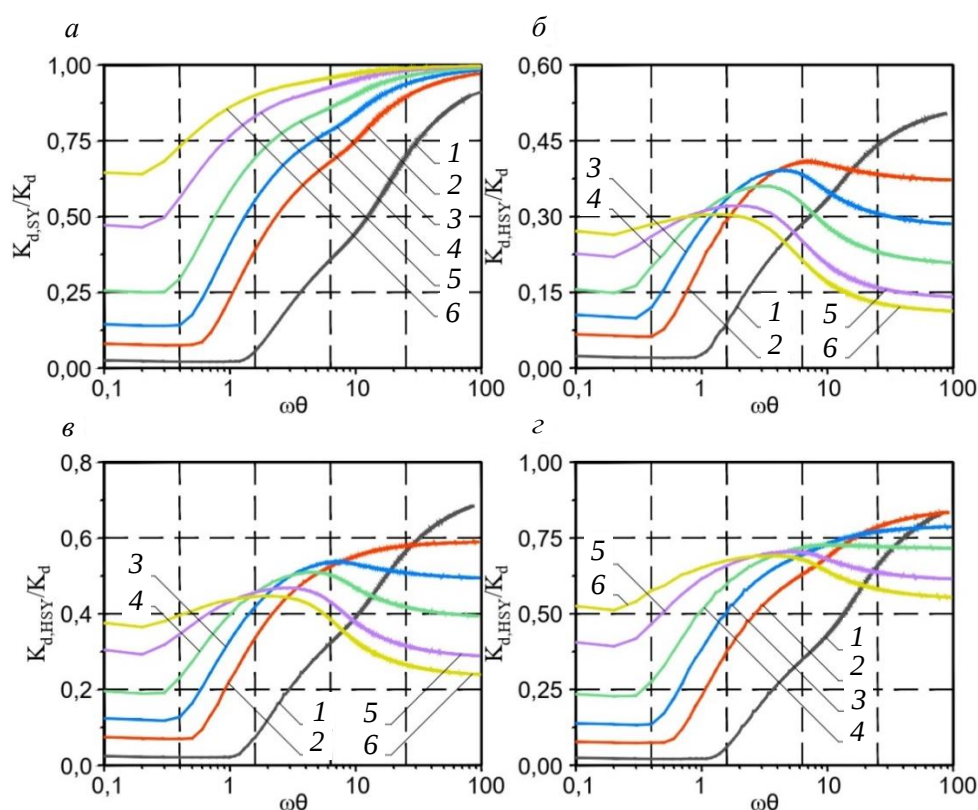


Рис. 7. Изменение $k_{d,H} / k_d$ зависимости от t_{el} / t_{max} железобетонных балок с распором ($c_1 = 1-10$) под действием мгновенно нарастающей нагрузки при $c_1 = \infty$ (а); при $c_1 = 1$ (б); $c_1 = 2,5$ (в); $c_1 = 1$ (г): $\theta_2 / \theta_1 = 1$ (1); $\theta_2 / \theta_1 = 5$ (2); $\theta_2 / \theta_1 = 10$ (3); $\theta_2 / \theta_1 = 20$ (4); $\theta_2 / \theta_1 = 50$ (5); $\theta_2 / \theta_1 = 100$ (6)

Таким образом, разработан метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах, деформируемых в упругой стадии, упругопластической и стадии отвердения при кратковременном динамическом нагружении. Метод расчета реализован в программном пакете Maple.

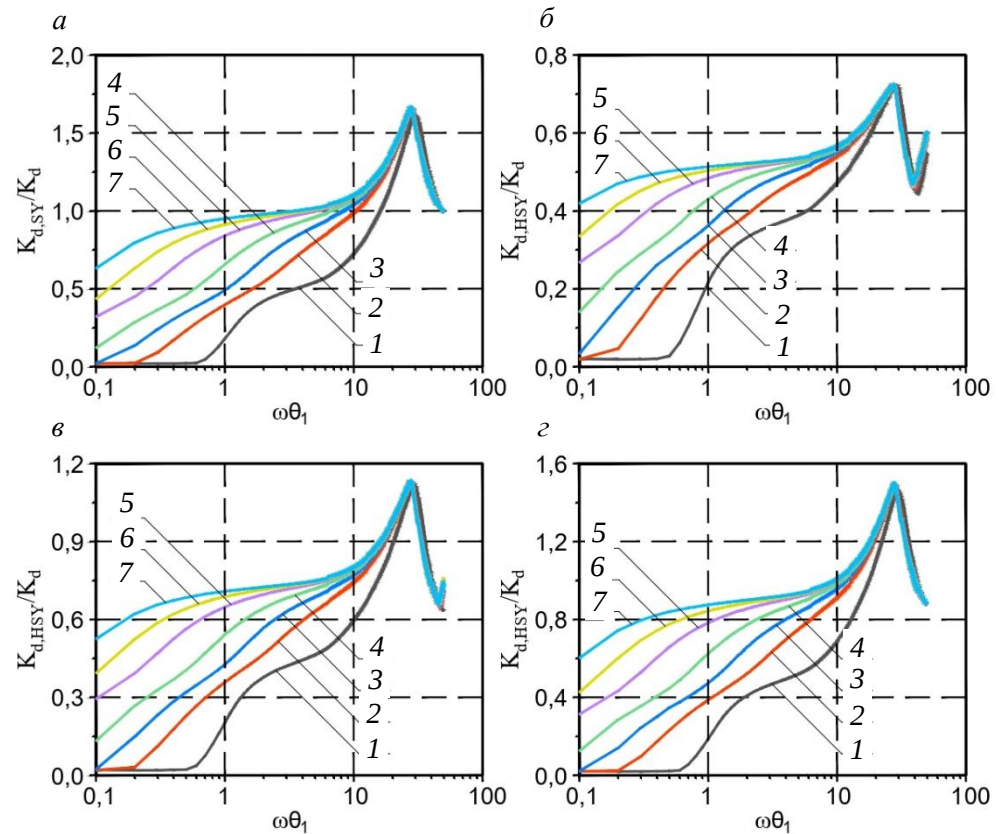


Рис. 8. Изменение $k_{d,H}/k_d$ зависимости от $t_{el}/t_{\max}$ железобетонных балок с распором ($c_1 = 1-10$) под действием постепенно нарастающей нагрузки при $c_1 = \infty$ (а); при $c_1 = 1$ (б); $c_1 = 2,5$ (в); $c_1 = 1$ (г): $\theta_2/\theta_1 = 1$ (1); $\theta_2/\theta_1 = 5$ (2); $\theta_2/\theta_1 = 10$ (3); $\theta_2/\theta_1 = 20$ (4); $\theta_2/\theta_1 = 50$ (5); $\theta_2/\theta_1 = 100$ (6)

Выполнен анализ влияния распора на прочность и деформативность железобетонных балок на податливых и жестких опорах при мгновенно и постепенно нарастающих динамических нагрузках. Показано, что реакция распора оказывает значительное влияние на железобетонные балки на жестких опорах. Установлено снижение коэффициента динамичности как при условно-упругом, так и пластическом деформировании конструкции с распором. Максимальное снижение коэффициента динамичности наблюдается при пластическом деформировании балки. Установлено, что эффективность распора увеличивается с ростом $\omega\theta$, а эффективность податливых опор, наоборот, уменьшается, что необходимо учитывать при расчете и проектировании железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдуль-Рахман А.С. Повышение несущей способности железобетонных конструкций при взрывных воздействиях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1995. 207 с.

2. *Галютдинов З.Р., Кумпяк О.Г.* Расчет железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2019. № 4. С. 63–70.
3. *Виноградова Т.Н.* Влияние распора на работу железобетонных балочных конструкций при кратковременных динамических воздействиях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1977. 155 с.
4. *Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Крылов С.М.* Новое о прочности железобетона. Москва : Стройиздат, 1976. 272 с.
5. *Кумпяк О.Г., Галютдинов З.Р.* Экспериментальные исследования опертых по контуру железобетонных плит с распором // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 3. С. 113–120.
6. *Попов Н.Н., Расторгуев Б.С.* Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. Москва : Стройиздат, 1964. 151 с.
7. *Тихонов И.Н.* Принципы расчета прочности и конструирования армирования балок перекрытий зданий из монолитного железобетона для предотвращения прогрессирующего разрушения // *Жилищное строительство : научно-технический и производственный журнал*. 2013. № 2. С. 40–45.
8. *Кумпяк О.Г., Галютдинов Д.Р.* Экспериментальные исследования железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23. № 6. С. 143–156. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-6-143-156>
9. *Кумпяк О.Г., Галютдинов З.Р., Кокорин Д.Н.* Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. 270 с.
10. *Кумпяк О.Г., Мецеулов Н.В., Люевич Я.С.* Динамическая прочность и деформативность наклонных сечений сжато-изгибаемых железобетонных конструкций на податливых опорах // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 6. С. 150–159.
11. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R.* Experimental study of beams on yielding supports with thrust // *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. DOI: 10.1051/1.4973016
12. *Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V.* Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading // *Engineering Structures*. 2015. № 96. P. 88–99.
13. *Кумпяк О.Г., Мецеулов Н.В.* Численное моделирование податливых опор в виде труб кольцевого сечения при статическом и кратковременном динамическом нагружении // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 5. С. 121–134.
14. *Kezmane A., Chiaia B., Kumpyak O., Maksimov V., Placidi L.* 3D modelling of reinforced concrete slab with yielding supports subject to impact load // *European Journal of Environmental and Civil engineering*. 2016. V. 21. P. 988–1025. DOI: 10.1080/19648189.2016.1194330
15. *Kumpyak O.G., Mesheulov N.V.* Numerical simulation of yielding supports the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loadings // *International Journal for computational Civil and Structural Engineering*. 2017. V. 13. № 4. P. 103–113.
16. *Elfeteri F.A.* Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*. 2013. V. 7. № 2.
17. *Fan Z., Shen J., Lu G.* Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes // *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Procedia Engineering*. 2011. V. 14. P. 442–449.
18. *Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y.* Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes // *Wseas transactions on applied and theoretical mechanics*. 2009. V. 4. № 3.
19. *Lipa S., Kotelko M.* Lateral impact of tubular structure – theoretical and experimental analysis. Part 1 – Investigation of single tube // *Journal of theoretical and applied mechanics*. 2013. V. 51. № 4. P. 873–882.

REFERENCES

1. Abdul'-Rakhman A.S. Povysheniye nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh konstruktsey pri vzryvnykh vozdeystviyakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Bearing capacity improvement of reinforced concrete structures under explosive impacts. PhD Thesis]. Moscow, 1995. 207 p. (rus)
2. Galyautdinov Z.R., Kumpyak O.G. Raschet zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Numerical calculation of reinforced concrete beams on compliant supports under dynamic loading]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2019. No. 4. Pp. 63–70. (rus)
3. Vinogradova T.N. Vliyaniye rasporya na rabotu zhelezobetonnykh balochnykh konstruktsey pri kratkovremennykh dinamicheskikh vozdeystviyakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Influence of spacing on the performance of reinforced concrete beam structures under dynamic load. PhD Thesis]. Moscow, 1977. 155 p. (rus)
4. Gvozdev A.A. Dmitriyev S.A., Krylov S.M. Novoye o prochnosti zhelezobetona [New about reinforced concrete strength]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 272 p. (rus)
5. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Eksperimental'nye issledovaniya opertykh po konturu zhelezobetonnykh plit s rasporyom [Experimental research of reinforced concrete edge supported slabs with spacers]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 3. Pp. 113–120. (rus)
6. Popov N.N., Rastorguyev B.S. Raschet zhelezobetonnykh konstruktsey na deystviye kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok [Dynamic load analysis of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat, 1964. 151 p. (rus)
7. Tikhonov I.N. Printsipy rascheta prochnosti i konstruirovaniya armirovaniya balok perekrytiy zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona dlya predotvrashcheniya progressiruyushchego razrusheniya [Strength analysis and design of building slab beam reinforcement made of monolithic reinforced concrete to prevent progressive fracture]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2013. No. 2. Pp. 40–45. (rus)
8. Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok s rasporyom na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Reinforced concrete beams on yielding supports with thrust under dynamic load]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 6. Pp. 143–156. (rus)
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports under dynamic load]. Tomsk: TSUAB, 2016. 270 p. (rus)
10. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V., Lyulevich Y.S. Dinamicheskaya prochnost' i deformativnost' naklonnykh sechenii szhato-izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktsey na podatlivykh oporakh [Dynamic strength and deformability of oblique planes in compressed and bended yielding supports]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 6. Pp. 150–159. (rus)
11. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. DOI: 10.1051/1.4973016
12. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*. 2015. No. 96. Pp. 88–99.
13. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Chislennoye modelirovaniye podatlivykh opor v vide trub kol'tsevogo secheniya pri staticheskoy i kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Numerical simulation of yielding supports in the form of annular tubes under static and dynamic loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 5. Pp. 121–134. (rus)
14. Kezmane A., Chiaia B., Kumpyak O., Maksimov V., Placidi L. 3D modelling of reinforced concrete slab with yielding supports subject to impact load. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016. V. 21. Pp. 988–1025. DOI: 10.1080/19648189.2016.1194330

15. Kumpyak O.G., Mesheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loadings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. V. 13. No. 4. Pp. 103–113.
16. Elfetori F.A. Experimental testing of composite tubes with different corrugation profile subjected to lateral compression load. World Academy of Science, Engineering and Technology. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*. 2013. V. 7. No. 2.
17. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of lateral crushing of sandwich tubes. In: *Proc. 12th East Asia-Pacific Conf. 'Structural Engineering and Construction Procedia Engineering'*. 2011. V. 14. Pp. 442–449.
18. Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact energy absorption of concentric circular tubes. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2009. V. 4. No. 3.
19. Lipa S., Kotelko M. Lateral impact of tubular structure – theoretical and experimental analysis. Part 1 – Investigation of single tube. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2013. V. 51. No. 4. Pp. 873–882.

Сведения об авторах

Кумпяк Олег Григорьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ogkumpyak@yandex.ru

Галютдинов Дауд Рашидович, ассистент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gazr@yandex.ru

Authors Details

Oleg G. Kumpyak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ogkumpyak@yandex.ru

Daud R. Galyautdinov, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gazr@yandex.ru

УДК 624.011

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-98-107

*Е.А. ЧАЙКИН, С.В. ДЕОРДИЕВ,
Сибирский федеральный университет*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ И РАСТЯЖЕНИЕ ДЕРЕВЯННОГО ЭЛЕМЕНТА С ВКЛЕЕННЫМИ СТАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Аннотация. Применение классических элементов структурных конструкций в полно-сборных зданиях замкнутого типа неэффективно по причине сложности их конструкции и металлоемкости узлов. В статье рассмотрены прочность, устойчивость и деформативность деревянного элемента с клееными металлическими пластинами, работающего в составе структурной многосвязной конструкции при действии сжимающих и растягивающих усилий на элемент.

В серии экспериментов установлены предельные нагрузки, вызывающие потерю устойчивости и разрушение опытных образцов, а также деформации древесины и металла исследуемых элементов.

В результате испытаний получены зависимости несущей способности элементов от характера загрузки, толщины и глубины клейки стальной пластины, а также аналитическая зависимость деформаций растяжения и сжатия элементов конструкции от усилий, которая может быть применена в расчетах по деформированной схеме и моделировании податливости соединений структурной многосвязной конструкции.

Ключевые слова: клеенные пластины, структурная конструкция, древесина, сжатие, растяжение, испытания, потеря устойчивости, использование отходов производства

Для цитирования: Чайкин Е.А., Деордиев С.В. Результаты испытаний на сжатие и растяжение деревянного элемента с клееными стальными пластинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 98–107.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-98-107

*E.A. CHAIKIN, S.V. DEORDIEV,
Siberian Federal University*

COMPRESSION AND TENSION TESTS OF WOODEN ELEMENTS WITH GLUED STEEL PLATES

Abstract. The use of classical elements in spatial structures of prefabricated buildings is inefficient due to a design complexity and specific quantity of metal in the assembled components. The paper studies the durability, stability and deformability of wooden elements with glued metal plates working in a multiply connected structure under compressive and tensile loads. The experiment series include maximum loads causing the loss of stability and destruction of prototypes as well as deformation of wooden and metal elements. As a result, the dependences are suggested for the carrying capacity of elements on the load type, thickness and depth of the glued steel plate, and the dependence of tension and compression of elements on the efforts. The latter can be applied in calculations under the strain scheme and modeling of the joint compliance of the multiply connected structure.

Keywords: glued plates, structural design, wood, compression, tension, tests, stability loss, production waste

For citation: Chaikin E.A., Deordiev S.V. Rezul'taty ispytaniy na szhatie i rastyazhenie derevyannogo elementa s vkleenymi stal'nymi plastinami [Compression and tension tests of wooden elements with glued steel plates]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 98–107.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-98-107

Для пространственных структурных конструкций, в узлах которых могут сопрягаться до 12 деревянных элементов, испытывающих за жизненный цикл знакопеременные усилия сжатия и растяжения, принципиально важным фактором при конструировании является уменьшение числа концентраторов напряжений на границе дерево – металл, а также в местах непосредственного соединения стержневых элементов в узлах. В отмеченных выше традиционных соединениях неизбежно возникает концентрация напряжений, которая приводит на начальных этапах к деформациям сдвига и смятия по дереву в наиболее нагруженных стержнях, а затем – к невыгодному перераспределению усилий и дальнейшей деформации конструкции в целом.

С целью применения деревянных элементов круглого сечения, в том числе из отходов деревообрабатывающей промышленности, в качестве стержней пространственной структурной конструкции наиболее часто используются металлические узлы и коннекторы [1, 2]. Наилучшим образом зарекомендовало себя применение в таких узлах цилиндрических и пластинчатых нагелей, а также клеенных стальных стержней [3–5].

Сопряжение деревянных элементов с помощью клеенных стержней позволяет снизить концентрацию напряжений, но имеет трудности реализации в рассматриваемой конструкции (рис. 1). Так по результатам расчета, согласно СП 64.13330.2017, требуемая длина для вклеивания стержня необходимого диаметра с двух торцов превышает длину деревянного стержня, а значит, использовать данный вид соединения элемента не представляется возможным. Увеличить количество стержней не позволяет относительно небольшой диаметр деревянного стержня, а увеличение длины элементов нецелесообразно в данной конструкции при модуле 0,75 м.

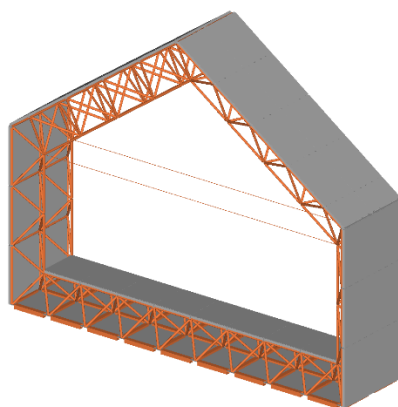


Рис. 1. Конструктивная схема блока здания замкнутого типа

Работы [11–13], выполненные в Оренбурге В.И. Жадановым и И.В. Рудневым, посвящены изучению прочности соединения деревянных элементов на стальных пластинах. Авторы указывают на зависимость прочности соединения от площади контакта металл-клей-древесина, формы стальной пластины, толщины клеевого соединения. С целью апробации результатов, полученных коллегами в работах [11,13], и оптимизации узла структурной конструкции проведена серия натурных испытаний деревянного элемента с вклеенными стальными пластинами на специально смонтированной установке на базе лаборатории ЛИСМиК СФУ.

Методика эксперимента

Эксперимент проводился с образцами, выполненными из крупномерных отходов фанерного производства (далее «карандаш»), используемыми в качестве стержней пространственной структурной конструкции. Образцы представляют собой деревянные стержни с вклеенными в торцах по центру сечения стальными пластинами (рис. 2) с различной глубиной вклейки – от 8 до 20 см. При этом в начале эксперимента толщина стальной пластины принималась в широком диапазоне от 2 до 5 мм с шагом 1 мм, но далее результаты показали, что использование стали толщиной более 3 мм нецелесообразно и ведет только к увеличению металлоемкости конструкции узла. Основные эксперименты проводились с пластинами толщиной 2 и 3 мм.

В эксперименте каждый образец состоял из «карандаша» круглого сечения диаметром 80 ± 2 мм длиной 1000 мм. Прочностные и деформационные характеристики материала стержня определены по соответствующим методикам нормативных документов экспериментальным путем в лаборатории ЛИСМиК СФУ. В первую очередь был определен модуль упругости как наиболее важная деформативная характеристика элементов, работающих на сжатие и растяжение. Он составил 8600 МПа для образцов из сосны.

В торцах «карандашей» по центру сечения для соединения с испытательной установкой были вклеены разработанные и изготовленные авторами коннекторы. В качестве торцевых коннекторов применялась прямоугольная листовая сталь сечением 80×3 мм и 80×2 мм с вариацией по длине в зависимости от длины вклейки, марка стали С235. Между собой деревянный стержень и стальные торцевые коннекторы соединялись в торцевом пропиле, сделанном на 2 мм шире толщины пластины, с применением эпоксидного двухкомпонентного клея CYD-128 (международный стандарт Q/SH 1085 007-2006) толщиной 1 мм с обеих сторон стальной пластины. Общий вид наконечника «карандаша» приведен на рис. 2.

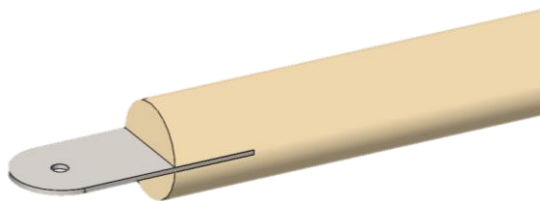


Рис. 2. «Карандаш» с вклеенной стальной пластиной

Испытания выполнены на специально изготовленном испытательном стенде, состоящем из двух продольных швеллеров, трех упорных двутавровых балок с ребрами жесткости, подвижной распределительной траверсы, съёмной распорки и гидравлического домкрата (рис. 3). Крепление образцов осуществляется посредством металлических уголков на болтах.

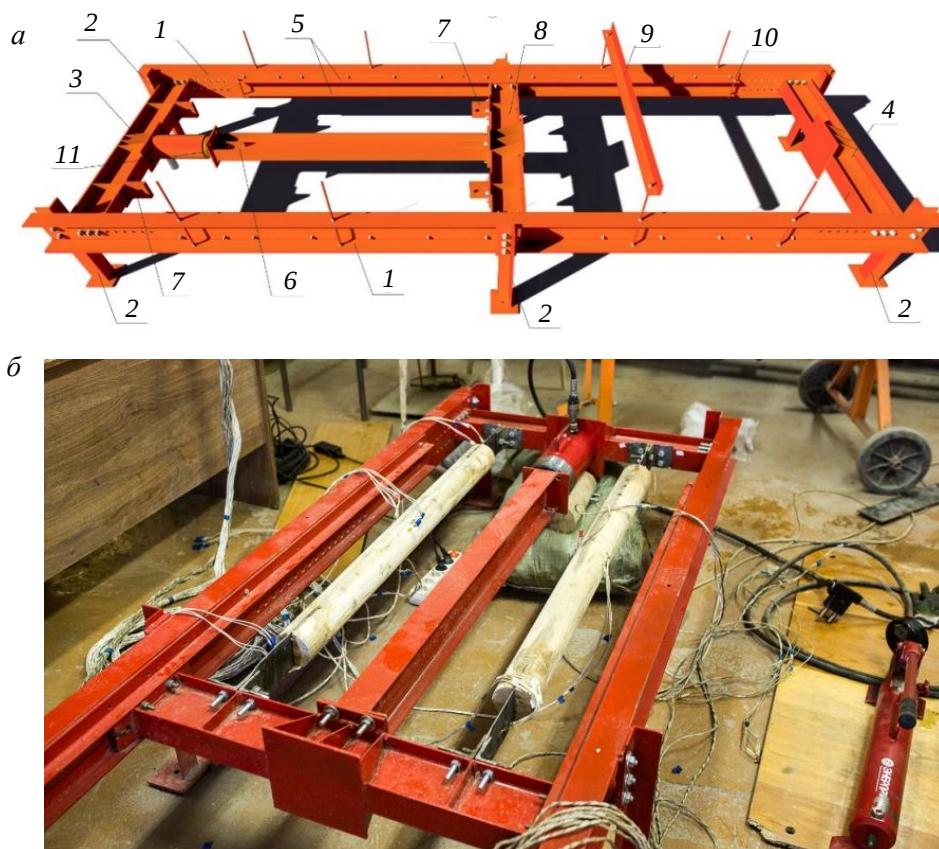


Рис. 3. Модель испытательного стенда (а); внешний вид испытательного стенда (б):
 1 – направляющие швеллеры (14П); 2 – стойки (L 50×6); 3 – упорная балка № 1 (двутавр № 12); 4 – упорная балка № 2 (двутавр № 12); 5 – направляющие уголки (L 32×4); 6 – распорка (двутавр № 12); 7 – уголки-держатели (L 75×50×5); 8 – подвижная распределительная траверса (двутавр № 12); 9 – страховочный уголок (L 40×4); 10 – ограничитель хода траверсы; 11 – домкрат

Сжатию до потери устойчивости и растяжению до разрушения были подвергнуты по 3 образца с глубиной вклейки пластин 80, 100, 150, 200 мм. Сжимающее и растягивающее усилия создавались ручным гидравлическим домкратом с максимальным развиваемым усилием 200 кН; средняя скорость испытаний – 10 мм/мин. При статическом нагружении для фиксации изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов использовали 3 индикатора часового типа (ИЧ-10) и 5 тензорезисторов марки 5П1-20-100-Б-12 с номинальным сопротивлением 99,651 Ом на каждый элемент. Для

преобразования данных и ведения журнала испытания применяли программный комплекс ММТС 64.01. Усилие, развиваемое гидравлическим домкратом, регистрировали гидравлическим манометром, установленным на домкрате, и сверяли с показаниями комплекса ММТС 64.01.

Чтобы уменьшить деформации податливости болтовых соединений, перед началом поэтапного нагружения образцов производили предварительное нагружение с последующим разгрузением до нагрузки 10 кН и обнулением датчиков деформаций. Таким образом достигали обжатия болтовых соединений в торцах и далее в эксперименте датчиками деформаций регистрировали только деформации элемента.

Результаты испытаний представлены в виде графиков на рис. 4, 5.

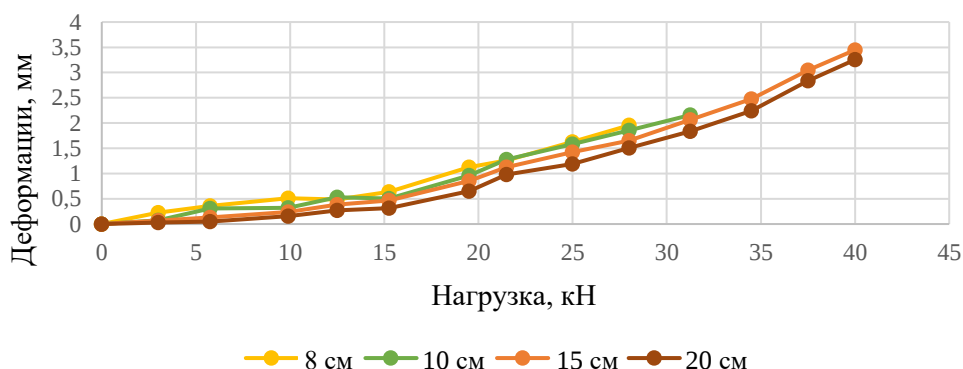


Рис. 4. График зависимости деформаций растяжения элемента от нагрузки при разных глубинах вклейки стальной пластины

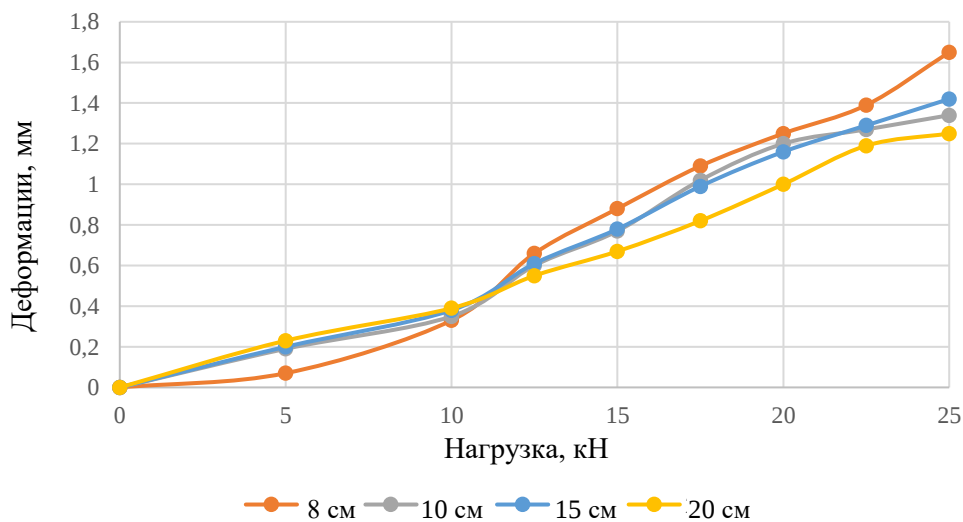


Рис. 5. График зависимости деформаций сжатия элемента от нагрузки при разных глубинах вклейки стальной пластины

При испытании элементов на растяжение прослеживается зависимость деформаций и предельной прочности элементов от глубины клейки пластины, в то время как зависимости от толщины клеиваемой пластины не наблюдается. Разрушения всех элементов происходят по клею и ближайшим к нему слоям древесины. Наблюдается деформирование отверстия в стальной пластине.

При испытании элементов на сжатие разрушение происходит при потере устойчивости стальных пластин на свободном от защемления участке между клейкой в древесину и зажимами испытательного стенда (рис. 6). Зависимости между деформациями, предельными усилиями и глубиной клейки пластин не наблюдается. Устойчивость элемента напрямую зависит только от толщины пластины.



Рис. 6. Формы потери устойчивости стальных пластин при испытании стержневых элементов на сжатие

Далее для анализа результатов испытаний были построены графики зависимости предельных усилий и деформаций от толщины стальных пластин и глубины их клейки (рис. 7, 8).

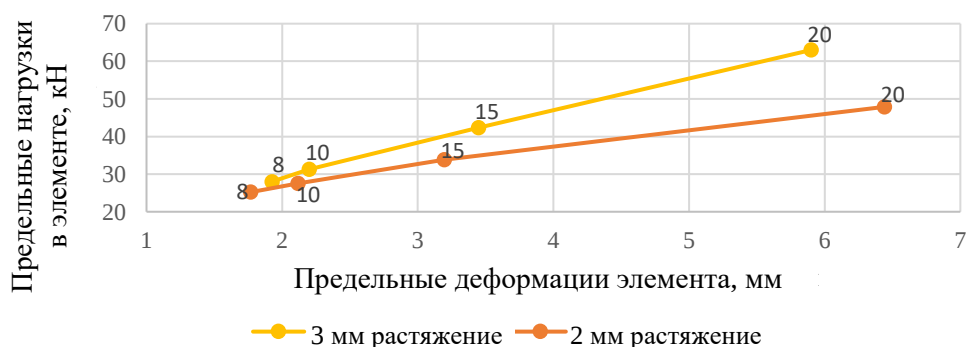


Рис. 7. График зависимости предельных деформаций растяжения элемента от предельных нагрузок при разных глубинах клейки стальной пластины

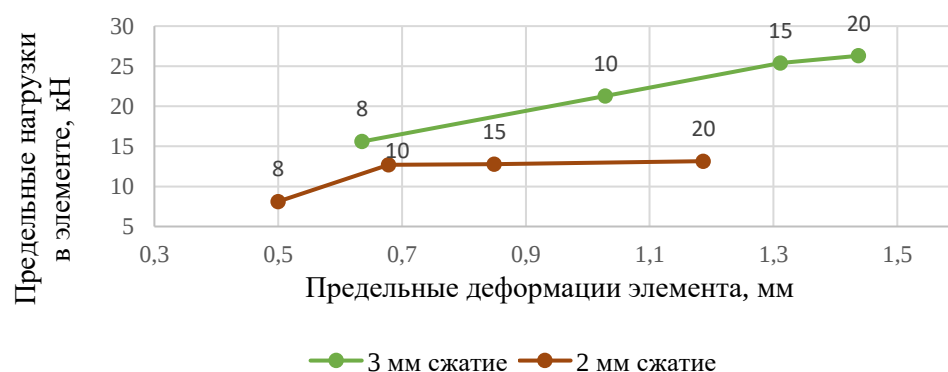


Рис. 8. График зависимости предельных деформаций сжатия элемента от предельных нагрузок при разных глубинах вклейки стальной пластины

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что при растяжении прочность элементов напрямую зависит от глубины вклейки стальных пластин, а деформации в элементах возрастают пропорционально усилиям. При сжатии слабым местом являются стальные пластины, и предел прочности всего элемента повышается с увеличением толщины пластин: так несущая способность пластин толщиной 2 мм исчерпывается при нагрузке примерно в 13 кН, а пластин толщиной 3 мм – при нагрузке более 25 кН.

Для удобства анализа работы элементов при варьируемых глубине вклейки и толщине стальной пластины все полученные результаты приведены на рис. 9.

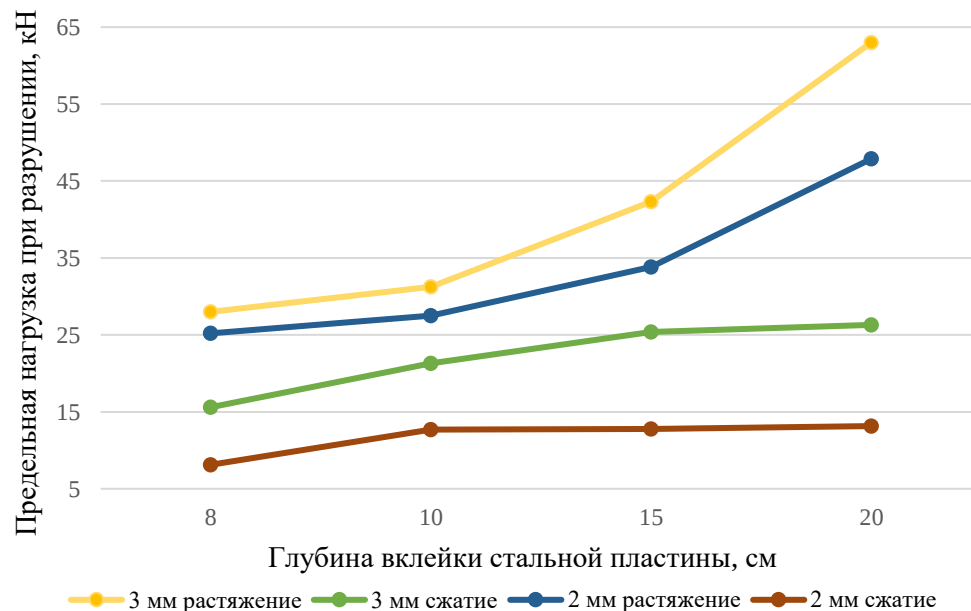


Рис. 9. График зависимости прочности элементов от характера загрузки, толщины и глубины вклейки стальной пластины

Поскольку при глубине вклейки стальных пластин в пределах 10–15 см достигается наибольшее приближение прочности элементов при растяжении и сжатии, в качестве основного варианта для дальнейших исследований прием элементы с глубиной вклейки 15 см. Данное решение позволит достичь наибольшей унификации элементов при конструировании и даст дополнительный запас прочности растянутым элементам.

По результатам анализа зависимостей, установленных в экспериментах, были получены формулы для расчета прогнозируемых деформаций в зависимости от усилия в элементе при глубине вклейки пластины 15 см:

– при сжатии

$$\Delta l_c = 0,014 \cdot N^{1,46};$$

– при растяжении

$$\Delta l_p = 0,005 \cdot N^{1,42},$$

где Δl_c – деформация сжатия элемента длиной 1 м, мм; Δl_p – деформация растяжения элемента длиной 1 м, мм; N – усилие в элементе, кН.

Этими формулами можно пользоваться для определения деформаций деревянного элемента, например, при расчете прогнозируемых деформаций конструкции, а также при расчете податливости на этапе моделирования для получения более точных расчетов. Данные формулы дают наибольшую точность при усилиях в элементе в пределах 5–30 кН.

С помощью полученных зависимостей можно точнее смоделировать узлы и элементы рассматриваемой конструкции, а также рассчитать влияние податливости элементов с учётом деформации древесины и металла в месте соединения.

Выводы

1. Несущая способность стержневых элементов с вклеенными в торцах стальными пластинами нелинейно изменяется в зависимости от глубины вклейки пластины при растяжении и не зависит от неё при сжатии элементов. Равнопрочность на растяжение и сжатие (устойчивость) элемента в данной конструкции достигается при глубине вклейки 100–150 мм.

2. Большую глубину вклейки рационально использовать в постоянно растянутых элементах, меньшую – в малонагруженных сжатых элементах и раскосах.

3. Клеевое соединение и стальная пластина являются практически недеформативными в данной конструкции, наибольшие деформации накапливаются в зоне отверстий болтовых соединений и в деревянном стержне.

4. При использовании пластины толщиной 3 мм достигается наибольшее приближение прочности стальных пластин на сжатие и прочности контакта металл-клей-древесина.

В дальнейших исследованиях необходимо установить зависимость прочности деревянного элемента с вклеенными металлическими пластинами от свободной длины «карандаша» и предусмотреть конструктивные решения для увеличения устойчивости металлических пластин без значительного увеличения металлоемкости узла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковальчук Л.М. Деревянные конструкции – проблемы и решения // Промышленное и гражданское строительство. 2001. № 10. С. 13–14.
2. Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Деордиев С.В., Захарюта В.В. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 61–70.
3. Царитова Н.Г., Лагутина Д.Р. Анализ существующих узловых соединений пространственных конструкций и разработка шарнирного узла // Современное строительство и архитектура. 2020. № 4 (20). С. 26–30.
4. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). Москва : РИФ «Стройматериалы», 2013. 308 с.
5. Steiger R., Serrano E., Stepinac M., Rajcic V., O'Neill C., McPolin D., Widmann R. Strengthening of timber structures with glued-in rods // Construction and Building Materials. 2015. V. 97. P. 90–105.
6. Руднев И.В., Жаданов В.И., Дмитриев П.А. К вопросу применения клеенных металлических пластин в соединениях деревянных конструкций // Строительная наука-2014: Теория, образование, практика, инновации : сб. трудов Международной научно-технической конференции. Архангельск : ООО «Типография “ТОЧКА”», 2014. С. 309–314.
7. Bradford M.A., Hassanieh A., Valipour H.R., Foster S.J. Sustainable Steel-timber Joints for Framed Structures // Procedia Engineering. 2017. V. 172. P. 2–12.
8. Lokaj A. Round Timber Bolted Joints with Steel Plates under Static and Cyclic Loading // Key Engineering Materials. 2014. V. 627. P. 29–32.
9. Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Деордиев С.В., Захарюта В.В. Полносборное здание замкнутого типа с каркасом из отходов фанерного производства // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 40–50.
10. Васылев В.Н., Безушко А.В. Конструктивные решения узлов сопряжения структурных покрытий для промышленных зданий // Металлические конструкции. 2016. № 4. С. 193–205.
11. Руднев И.В., Жаданов В.И., Лисов С.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 4. С. 5–8.
12. Руднев И.В., Жаданов В.И. Методика расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 5. С. 155–161.
13. Пересыпкина В.А., Жаданов В.И. Стальные клеенные пластины в узловых соединениях деревянных конструкций // Шаг в науку. 2021. № 1. С. 94–97.

REFERENCES

1. Koval'chuk L.M. Derevyannyye konstruktssii – problemy i resheniya [Wooden structures: Problems and solutions]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2001. V. 10. Pp. 13–14. (rus)
2. Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Deordiev S.V., Zakharyuta V.V. Analiz sushchestvuyushchikh uzlov sopryazheniya prostranstvennykh konstruktssiy i razrabotka sborno-razbornogo uzlovogo elementa [Analysis of assembled components of structures and development of nonassembled component]. *Vestnik MGSU*. 2013. No. 3. Pp. 61–71. (rus)
3. Tsaritova N.G., Lagutina D.R. Analiz sushchestvuyushchikh uzlovykh soyedineniy prostranstvennykh konstruktssiy i razrabotka sharnirnogo uzla [Analysis of assembled components of structures and development of pin-connected joint]. *Sovremennoye stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. V. 4 (20). Pp. 26–30. (rus)
4. Turkovskiy S.B., Pogorel'tsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. Kleyennyye derevyannyye konstruktssii s uzlamy na vkleyennykh sterzhnyakh v sovremennom stroitel'stve (sistema TSNIISK) [Glued wooden structures with assemblies on glued rods in modern construction]. Moscow: Stroimaterialy, 2013. 308 p. (rus)

5. Steiger R., Serrano E., Stepinac M., Rajcic V., O'Neill C., McPolin D., Widmann R. Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials*. 2015. V. 97. Pp. 90–105.
6. Rudnev I.V., Zhadanov V.I., Dmitriyev P.A. K voprosu primeneniya vkleyennykh metallicheskih plastin v soyedineniyakh derevyannykh konstruktсий [Toward the use of glued metal plates in joints of wooden structures]. In: *Stroitel'naya nauka-2014: Teoriya, obrazovaniye, praktika, innovatsii: Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Proc. Int. Sci. Conf. 'Building Science-2014: Theory, Education, Practice, Innovation')*. Arkhangel'sk: Tipografiya "Tochka", 2014. Pp. 309–314. (rus)
7. Bradford M.A., Hassanieh A., Valipour H.R., Foster S.J. Sustainable steel-timber joints for framed structures. *Procedia Engineering*. 2017. V. 172. Pp. 2–12.
8. Lokaj A. Round timber bolted joints with steel plates under static and cyclic loading. *Key Engineering Materials*. 2014. V. 627. Pp. 29–32.
9. Inzhutov I.S., Dmitriyev P.A., Zhadanov V.I., Deordiyev S.V., Zakharyuta V.V. Polnosbornoye zdaniye zamknutogo tipa s karkasom iz otkhodov fanernogo proizvodstva [Fully prefabricated building of a closed type with a frame from plywood production waste]. *Vestnik MGSU*. 2013. V. 7. Pp. 40–50. (rus)
10. Vasylev V.N., Bezushko A.V. Konstruktivnyye resheniya uzlov sopryazheniya strukturnykh pokrytiy dlya promyshlennykh zdaniy [Structural solutions for assembled components of structural coatings for industrial buildings]. *Metallicheskiye konstruksii*. 2016. V. 4. Pp. 193–205. (rus)
11. Rudnev I.V., Zhadanov V.I., Lisov S.V. Soyedineniya elementov derevyannykh konstruktсий s primeneniye vkleyennykh stal'nykh plastin [Joint elements of wooden structures with glued steel plates]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2014. V. 4. Pp. 5–8. (rus)
12. Rudnev I.V., Zhadanov V.I. Metodika rascheta soyedineniy elementov derevyannykh konstruktсий na vkleyennykh stal'nykh plastinakh [Calculation of joint elements of wooden structures with glued steel plates]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. V. 5. Pp. 155–161. (rus)
13. Peresypkina V.A., Zhadanov V.I. Stal'nyye vkleyennyye plastiny v uzlovykh soyedineniyakh derevyannykh konstruktсий [Steel glued plates in joint elements of wooden structures]. *Shag v nauku*. 2021. V. 1. Pp. 94–97. (rus)

Сведения об авторах

Чайкин Евгений Александрович, ст. преподаватель, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, utatso@gmail.com

Деордиев Сергей Владимирович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Authors Details

Evgenii A. Chaikin, Senior Lecturer, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, utatso@gmail.com

Sergey V. Deordiev, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia. deordievsv@yandex.ru

УДК 624.078

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-108-121

*О.Г. КУМПЯК, Н.В. МЕЩЕУЛОВ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОЧНОГО ТИПА НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ

Аннотация. В связи с активным ростом вероятности возникновения динамических воздействий природного и техногенного характера на здания и сооружения, всё чаще появляется необходимость проектирования железобетонных конструкций, устойчивых к данному типу нагрузок. Целью настоящей работы является экспериментальное изучение влияния активного способа защиты в виде податливых опор и уровня продольного обжатия на прочность и деформативность наклонных сечений сжато-изогнутых железобетонных конструкций.

В работе изложена методика экспериментальных исследований. Установлено, что при уменьшении жёсткости податливых опор значительно увеличивается время сопротивления конструкции. При увеличении уровня продольного обжатия происходит уменьшение деформаций поперечной арматуры конструкций. Показано, что применение упругопластических податливых опор в сравнении с жестким опиранием приводит к снижению деформаций поперечной арматуры.

Ключевые слова: сжато-изгибаемые железобетонные конструкции, податливые опоры, наклонные сечения, прочность, деформативность, динамическая нагрузка

Для цитирования: Кумпяк О.Г., Мещеулов Н.В. Особенности динамического деформирования сжато-изогнутых конструкций балочного типа на податливых опорах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 108–121.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-108-121

*O.G. KUMPYAK, N.V. MESHCHUEULOV,**Tomsk State University of Architecture and Building*

DYNAMIC DEFORMABILITY OF OBLIQUE SECTIONS OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE BEAMS ON YIELDING SUPPORTS

Abstract. Due to the growing possibility of the likelihood of dynamic loads on buildings from natural and man-made emergency situations, it is necessary to design reinforced concrete structures resistant to such impacts. The aim of this work is to study effective methods of the structure protection such as yielding supports and longitudinal compression, deformability of oblique sections of reinforced concrete structures under compression and bending. The paper proposes the experimental methodology. It is shown that time of the structural resistance significantly increases with decreasing stiffness of yielding supports. When the longitudinal compression grows, deformation of transverse reinforcement reduces in the structure. It is demonstrated that the use of elastoplastic yielding supports reduces deformation of transverse reinforcement as compared to rigid supports.

Keywords: reinforced concrete structure, compression, bending, yielding support, oblique section, strength, deformability, dynamic load

For citation: Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Osobennosti dinamicheskogo deformirovaniya szhato-izognutykh konstrukttsii balochnogo tipa na podatlivykh oporakh [Dynamic deformability of oblique sections of compressed reinforced concrete beams on yielding supports]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 108–121.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-108-121

Введение

В настоящее время для обеспечения восприятия зданиями и сооружениями кратковременных динамических нагрузок применяется два принципиально разных подхода. Первый реализуется через увеличение несущей способности конструкций использованием материалов с повышенными физико-механическими характеристиками (высокопрочный бетон и арматура), более интенсивное армирование, увеличение поперечного сечения элементов. Однако при этом повышение динамической прочности конструкций не всегда может быть реализовано с технологической точки зрения или быть экономически целесообразным. Другим способом защиты конструкций является снижение интенсивности и локализация динамического воздействия за счет применения податливых опор, которые, деформируясь, воспринимают на себя избыточную часть взрывной энергии, разгружая и оставляя неповрежденными несущие элементы [1–4].

В настоящее время исследования, в которых рассмотрено влияние податливости опорных закреплений на реакцию железобетонных конструкций, ограничиваются несколькими работами.

Экспериментально-теоретическими исследованиями ряда ученых [5–12] установлено, что учет податливости опорных закреплений оказывает существенное влияние на работу железобетонных конструкций при динамическом нагружении, а увеличение податливости опорных закреплений приводит к снижению усилий в них.

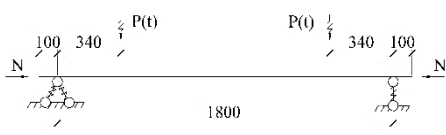
Несмотря на глубокие теоретические и экспериментальные исследования в области поведения изгибаемых и сжато-изгибаемых железобетонных конструкций при кратковременном динамическом нагружении, вопросы влияния продольного обжатия и податливого опирания на прочность и деформативность наклонных сечений остаются малоизученными.

Методика проведения экспериментальных исследований

Для изучения влияния продольного обжатия на прочность и деформативность наклонных сечений были изготовлены и испытаны шестнадцать конструкций с относительным пролетом среза $a = 2h_0$, в которых помимо продольного обжатия, равного $N = 0$ и $0,4N_{\max}$, где $N_{\max} = R_{bn}bh$, изменялись стадии деформирования податливых опор (жесткая – условно недеформируемая, упругопластическая). При этом рассматривали динамическое деформирование сжато-изгибаемых конструкций для двух предельных состояний. Первое – состояние 1^а, работа поперечной арматуры рассматривается в области упругих

деформаций (напряжения менее $\sigma_{0,2}$). Второе – состояние 1^б, деформации поперечной арматуры превышают значения, соответствующие условному пределу текучести стали, и наблюдается разрушение сжатой зоны бетона над критической наклонной трещиной. Программа исследований представлена в таблице.

Программа экспериментальных исследований

Условия испытания	Динамическое нагружение			
Уровень обжатия	N = 0		N = 0,4N _{max}	
Схема испытаний				
Шифр образца	БДЖ-0 ^(у; п)	БДУП-0 ^(у; п)	БДЖ-04 ^(у; п)	БДУП-04 ^(у; п)
Количество	2/2*	2/2*	2/2*	2/2*
Стадия работы образца	Упругая	Упругая	Упругая	Упругая
	Упруго-пластическая	Упруго-пластическая	Упруго-пластическая	Упруго-пластическая
Стадия работы опоры	Жёсткая	Упруго-пластическая	Жёсткая	Упруго-пластическая

* – указывает на количество образцов, испытанных в упругой^(у) / упругопластической стадии^(п).

Шифр образца указывает на условия испытания конструкции. Индекс (Д) в обозначении говорит о том, что балка испытана динамической нагрузкой. Следующие за ним буквы обозначают стадию динамического деформирования опоры: (Ж) – жесткая (условно недеформируемая), (УП) – упругопластическая. Цифра указывает относительный уровень продольного обжатия. Верхний индекс в шифре свидетельствует о предельном состоянии, в котором сработала конструкция: ^(у) – состояние 1^а, ^(п) – состояние 1^б.

Так, опытный образец БДУП-04^(п) расшифровывается следующим образом: образец испытан динамической нагрузкой (состояние 1^б), на податливых опорах, сработавших в упругопластической стадии, уровень продольного обжатия составлял $N = 0,4N_{\max}$.

Железобетонные образцы балочного типа изготовлены из бетона марки М400 размерами: длина 2000 мм, ширина 100 мм, высота 200 мм. Армированы балки пространственным каркасом (рис. 1).

Поперечное армирование выполнено из двух стержней холоднодеформированной арматуры класса Вр500 диаметром 3 мм (условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 565$ МПа) с шагом 50 мм в приопорной зоне и 100 мм в середине пролета.

Продольное армирование выполнено из горячекатаной стержневой арматуры класса А240, 2Ø6 мм ($\mu_s = 0,28\%$) в сжатой зоне элемента и горячекатаной стержневой арматуры класса А500, 2Ø18 мм ($\mu_s = 2,55\%$) в растянутой зоне.

Опытные образцы изготовлены из тяжелого бетона идентичного состава компонентов по массе 1:1,5:3 (цемент : песок : щебень) плотностью

$\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ при водоцементном отношении $W/C = 0,5$. Изготовление бетонной смеси производилось на основе портландцемента по ГОСТ 30515–2013 марки ЦЕМ I 42,5Б Топкинского завода с пределом прочности на сжатие $R = 46,8 \text{ МПа}$, щебня с фракцией 5–20 мм и предварительно промытого и высушенного карьерного песка.

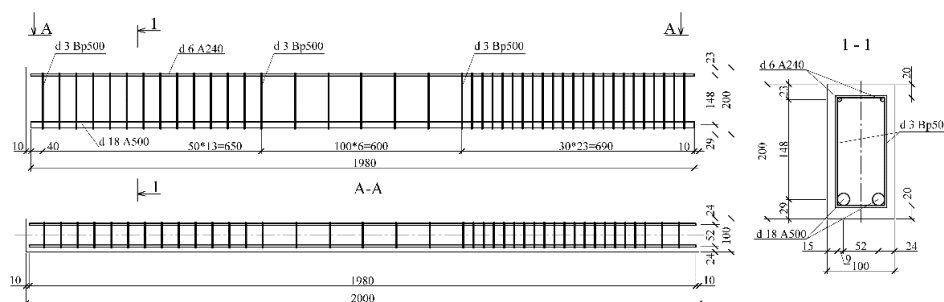


Рис. 1. Армирование экспериментальных образцов

Перед испытаниями на балках был установлен комплекс измерительных приборов (рис. 2): деформации арматуры и бетона регистрировались датчиками деформаций (тензорезисторы) 5П1-10-200-Б-12 измерительной базой 20 мм ($R = 201 \pm 0,1 \text{ Ом}$) на поперечной арматуре и 5П1-50-300-Б-12 измерительной базой 50 мм ($R = 308 \pm 0,1 \text{ Ом}$) на бетоне.



Рис. 2. Электронно-измерительные приборы:

а – датчик деформаций 5П1-10-200-Б-12 (тензорезистор) с базой 20 мм; *б* – датчик деформаций 5П1-50-300-Б-12 с базой 50 мм; *в* – устройство для измерения перемещения опоры; *г* – прогибомер WayCon SL50-G-SR; *д* – силомер ДСТ 4126; *е* – датчик ускорений – акселерометр Tokyo Sokki Kenkyujo corporation, ARE-100000A

После присоединения выводных проводов тензорезисторы покрывались гидроизоляционным слоем, приготовленным на основе эпоксидной смолы.

Измерение приращения деформаций податливых опор при деформировании производилось при помощи специально разработанного устройства (патент на полезную модель РФ: № 176603), основанного на базе прогибомеров WayCon SL50-G-SR, измерение прогибов различных участков конструкции осуществлялось прогибомерами WayCon SL150-G-SR. Измерение величины нагрузки и опорных реакций производилось силоизмерительным устройством ДСТ 4126, ускорение различных участков конструкции регистрировалось акселерометрами Tokyo Sokki Kenkyujo corporation, ARE-100000A.

Фиксация и обработка данных измерительных приборов осуществлялись с использованием системы электронно-вычислительного оборудования MIC300M и MIC400D (рис. 3).



Рис. 3. Комплекс электронно-вычислительного оборудования: MIC300M (слева); MIC400D (справа)

Размещение измерительного оборудования осуществлялось в соответствии с расчетной схемой экспериментальных исследований и характером деформирования и разрушения изгибаемых и сжато-изгибаемых конструкций по наклонным сечениям (рис. 4, 5).

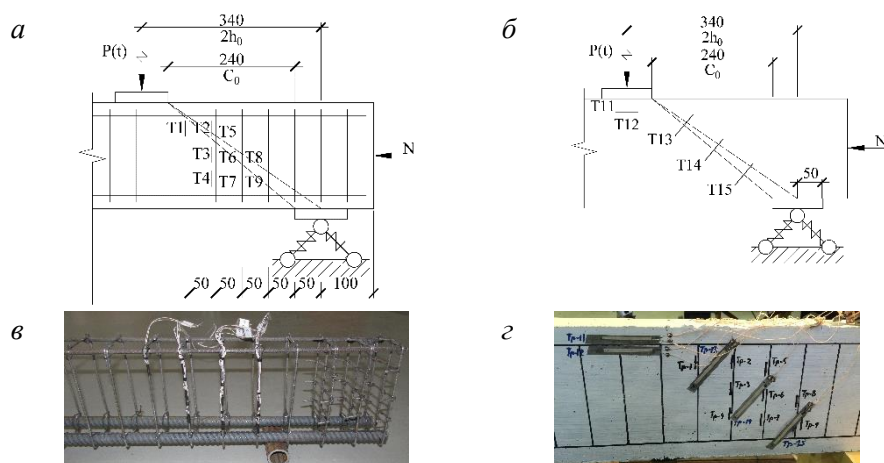


Рис. 4. Схема расположения тензорезисторов на поперечной арматуре (а) и бетоне (б); общий вид расположения тензорезисторов на поперечной арматуре (в) и бетоне (г)

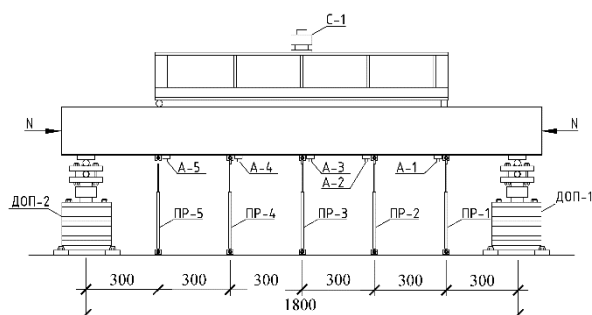


Рис. 5. Схема расположения прогибомеров (ПР-1...ПР-5), акселерометров (А-1...А-5), динамометрических опор (ДОП-1... ДОП-2) и силомера (С-1)

Датчики деформаций поперечной арматуры и бетона располагались в зоне предполагаемого образования и развития критической наклонной трещины, проходящей между внешним краем грузовой и внутренним краем опорной площадок. Датчики ускорений и перемещений были размещены в зоне чистого изгиба под грузовой площадкой и равномерно в пролете балки с шагом 300 мм.

Исследования конструкций выполнялись на специально разработанном и изготовленном стенде – копровой установке (патенты на полезную модель РФ: № 161908; № 152647, евразийский патент на изобретение № 027864) (рис. 6).

Динамическое нагружение осуществлялось путём свободного падения груза 3 по вертикальным направляющим 11. Нагрузка на образец передавалась в двух сечениях в соответствии с расчетной схемой (рис. 4) посредством распределительной траверсы 7. В опорной зоне располагалась податливая опора 12.

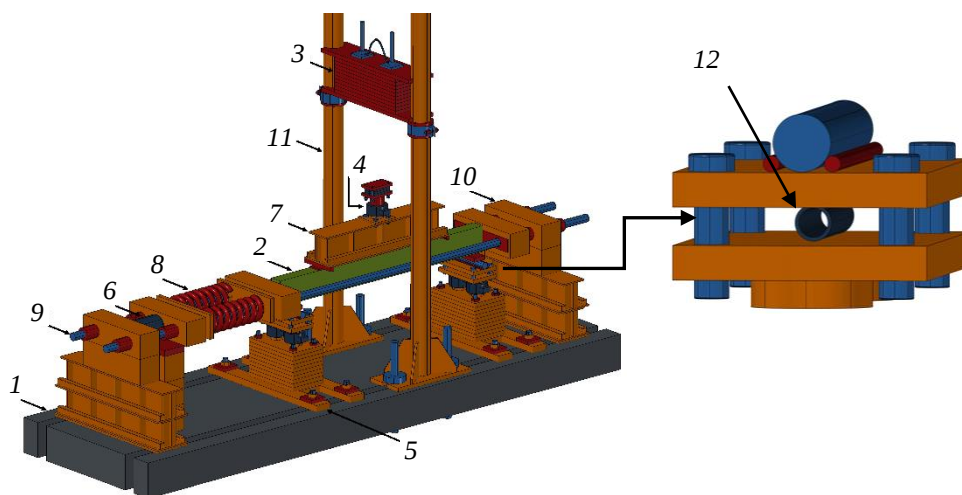


Рис. 6. Схема стенда для испытаний сжатых конструкций поперечной кратковременной динамической нагрузкой:

1 – силовой пол; 2 – образец; 3 – груз; 4 – силомер; 5 – динамометрическая опора с установленной податливой вставкой; 6 – гидродомкрат; 7 – распределительная траверса; 8 – пружина; 9 – горизонтальные тяжи; 10 – упорные траверсы; 11 – вертикальные направляющие; 12 – податливая опора

Согласно предварительным расчетам балок на действие однократной динамической нагрузки и анализу деформирования идентичных конструкций на действие статической нагрузки, масса груза была принята 265 кг, высота его падения 150 мм для случая, в котором рассматривается работа поперечной арматуры в области упругих деформаций (состояние 1^а) и 650 мм для случая деформирования образцов при работе поперечной арматуры, выходящей за условный предел текучести арматурной стали (состояние 1^б).

С целью исключения отскока образцов после динамического воздействия и получения более достоверных данных о сопротивлении железобетонных конструкций при динамическом воздействии, предварительно была произведена фиксация балок на опорах, исключая вертикальное перемещение конструкций, но допускающая их поворот на опоре (рис. 7).

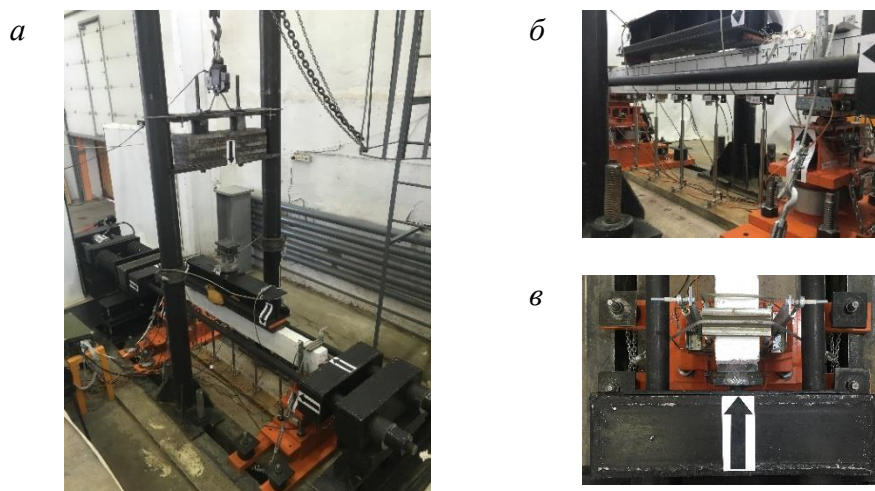


Рис. 7. Общий вид испытательного стенда на действие кратковременной динамической нагрузки (а); размещение измерительного оборудования (б); устройство опорного закрепления на динамометрической опоре (вид сверху) (в)

Деформативность наклонных сечений при работе поперечной арматуры в зоне упругих деформаций

Экспериментальные исследования показали, что при повышении уровня продольного сжимающего усилия происходит увеличение реакции конструкции на динамическое воздействие. Данную закономерность можно проследить на диаграммах сопротивления балочных конструкций по наклонным сечениям при динамическом нагружении (рис. 8).

Причем отмеченная закономерность проявляется как для сжато-изгибаемых балок, испытанных на жестких опорах, так и для конструкций на податливых опорах. При этом для балок на податливых опорах при одинаковом уровне продольного обжатия произошло уменьшение реакции конструкции в два раза.

Так для балки без продольного обжатия на жестких опорах (БДЖ-0^(у)) реакция конструкции равна 67,3 кН (рис. 8, а), а на упругопластических опорах (БДУП-0^(у)) – 32,7 кН (рис. 8, в).

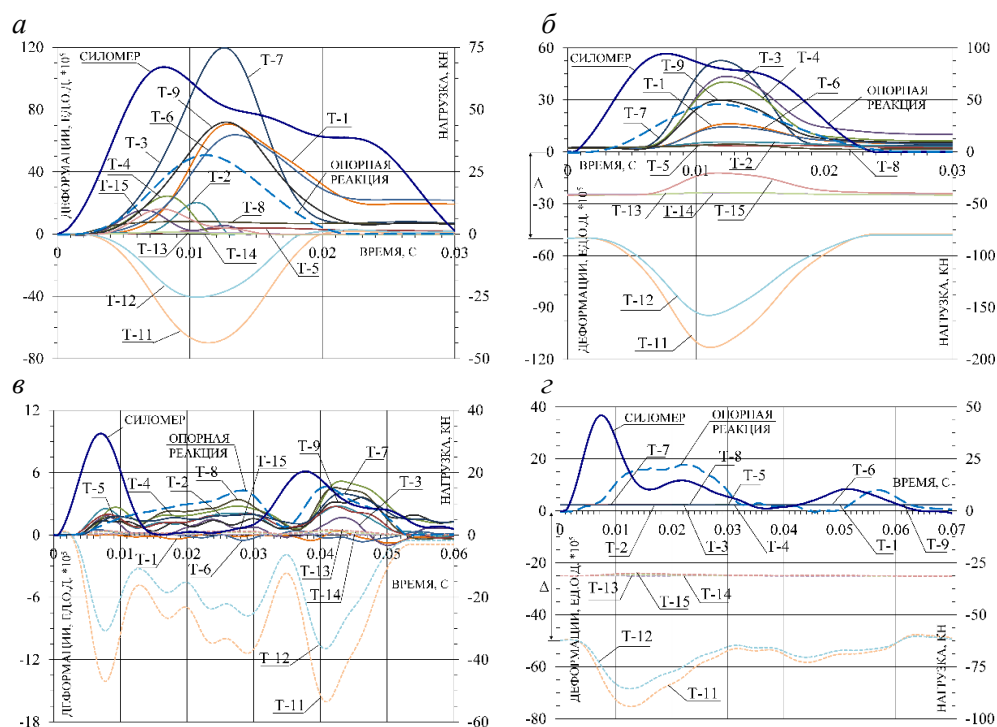


Рис. 8. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении образцов: (БДЖ-0^(y)) (а); (БДЖ-04^(y)) (б); (БДУП-0^(y)) (в) и (БДУП-04^(y)) (г) при кратковременном динамическом нагружении; Δ – начальные деформации бетона в результате предварительного продольного обжатия

С продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$ на жёстких опорах реакция балки (БДЖ-04^(y)) равна 95 кН (рис. 8, б), а на упругопластических опорах (БДУП-04^(y)) – 46 кН (рис. 8, г).

На диаграммах прослеживается увеличение времени сопротивления конструкций по наклонным сечениям, испытанных на податливых опорах (50 мс) (рис. 8, в, г), по отношению к образцам на жестких опорах (рис. 8, а, б) (15 мс) в 2,5–3 раза, что говорит о более пластичной работе наклонного сечения, причем данный характер деформирования отмечается для конструкций с продольным обжатием и без него.

При испытании образцов на податливых опорах (рис. 8, в, г) в процессе динамического воздействия зафиксировано несколько характерных пиков на диаграммах опорных реакций, свидетельствующих об активной работе сминаемых вставок.

При увеличении продольного обжатия наблюдается повышение уровня динамического сопротивления и опорной реакции конструкций, что свидетельствует об их более жесткой работе. Причем данная закономерность справедлива как при жестком, так и при податливом опирании.

Наибольшее значение динамической реакции балки и её опорной реакции наблюдается при испытании образцов на жестких опорах при уровне продольного обжатия $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04^(y)).

При испытании конструкций без продольного обжатия (БДЖ-0^(y)) величина сопротивления и опорной реакции снизилась на 29,2 % по отношению к образцу с продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04^(y)).

Деформативность наклонных сечений при работе поперечной арматуры за условным пределом текучести

Экспериментальными исследованиями конструкций при поперечном динамическом воздействии установлено, что с повышением уровня продольного обжатия происходит увеличение реакции конструкции на динамическое воздействие. Данную закономерность можно проследить на диаграммах сопротивления наклонных сечений балок динамической нагрузки (рис. 9–12).

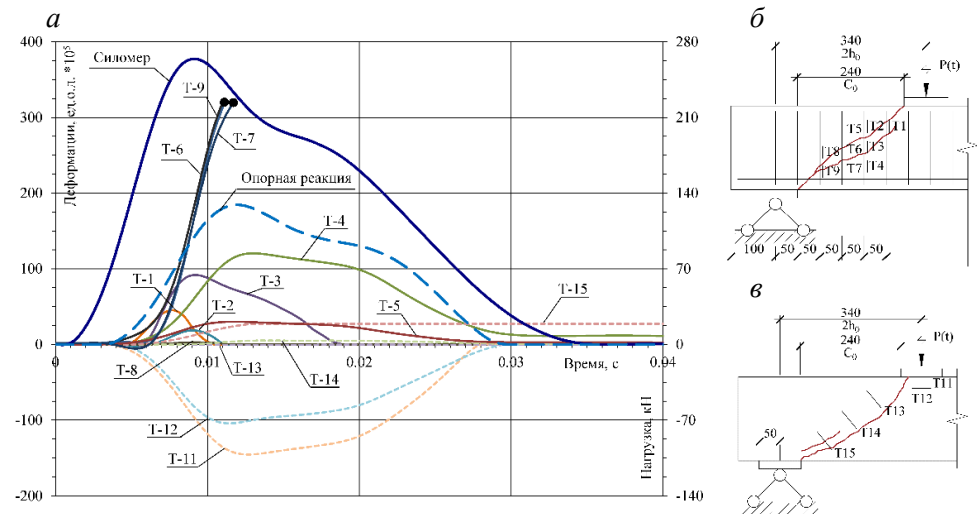


Рис. 9. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении изгибаемой конструкции (БДЖ-0^(m)) при кратковременном динамическом нагружении (а); схема трещинообразования и размещения тензорезисторов (б, в); ● – обрыв датчика или превышение измерительного диапазона

Степень влияния продольного сжимающего усилия и податливости опор на прочность и деформативность наклонных сечений изгибаемых железобетонных конструкций при поперечном динамическом воздействии можно оценить на основе деформаций поперечной арматуры при опирании на жесткие (рис. 9, 10) и упругопластические (рис. 11, 12) опоры.

На диаграммах сопротивления конструкций по наклонным сечениям (рис. 9–12) прослеживается увеличение времени деформирования образцов, испытанных на упругопластических опорах (БДУП^(m)) ($\approx 30\text{--}35$ мс), по отношению к образцам, испытанным на жестких опорах (БДЖ⁽ⁿ⁾) ($\approx 15\text{--}20$ мс), в среднем в два раза. Это говорит о более пластичной работе наклонного сечения при использовании податливых опор. Вместе с тем увеличение уровня продольного обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ приводит к сокращению времени деформирования конструкций по наклонным сечениям.

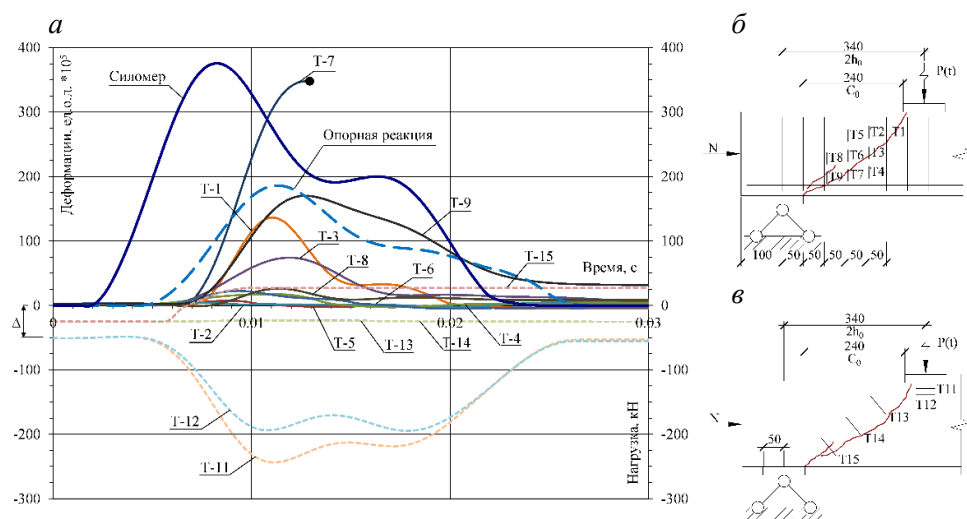


Рис. 10. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении сжато-изгибаемой конструкции (БДЖ-04⁽ⁿ⁾) при кратковременном динамическом нагружении с продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (а); схема трещинообразования и размещения тензорезисторов (б, в); • – обрыв датчика или превышение измерительного диапазона; Δ – деформации бетона в результате предварительного продольного обжатия балки

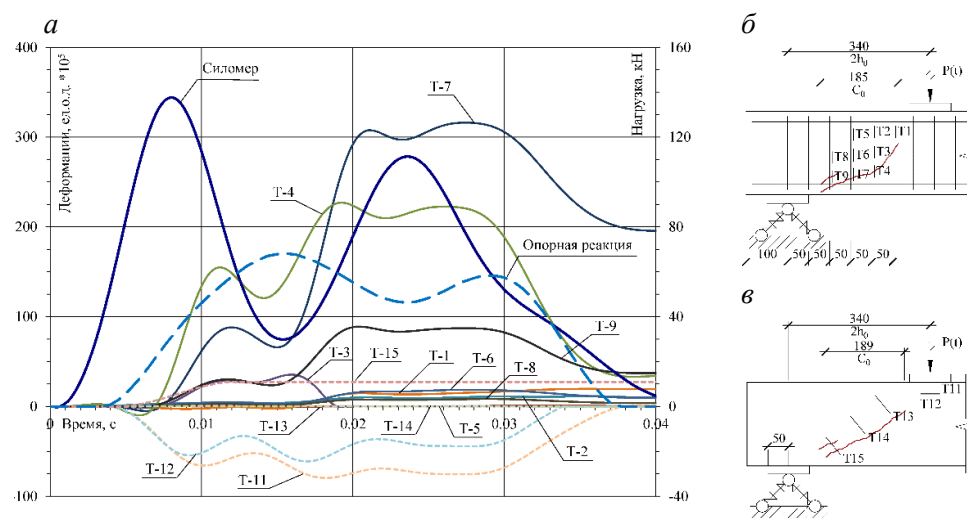


Рис. 11. Диаграмма сопротивления и деформации арматуры и бетона в наклонном сечении изгибаемой конструкции (БДУП-0⁽ⁿ⁾) при кратковременном динамическом нагружении (а); схема трещинообразования и размещения тензорезисторов (б, в)

В большей степени это наблюдается при жестком опирании и в меньшей степени проявляется при работе конструкций на пластических опорах. Время деформирования образцов на жестких опорах с обжатием $N = 0,4N_{\max}$ (БДЖ-04⁽ⁿ⁾) снижается на 20 % относительно опытных балок без обжатия (БДЖ-0⁽ⁿ⁾).

Вместе с тем установлено, что при испытании конструкций на опорах, работающих в пластической (БДУП^(н)) стадии, происходит снижение динамического сопротивления и значения величины опорной реакции по отношению к жесткому (БДЖ^(н)) опиранию. Так, для образцов без продольного обжатия $N = 0$, испытанных на жестких опорах, по отношению к конструкциям, испытанным на опорах, сработавших в пластической стадии, уменьшение составляет $\text{БДЖ-0}^{(н)} / \text{БДУП-0}^{(н)} = 1,78\text{--}2,1$; при увеличении значения обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ происходит уменьшение опорной реакции и реакции балок, испытанных на жестких и упругих опорах, по отношению к образцам, испытанным на пластических опорах: $\text{БДЖ-04}^{(н)} / \text{БДУП-04}^{(н)} = 1,86\text{--}2,15$.

Характер развития трещин в зоне действия поперечных сил представлен на рис. 9, б, в – 12, б, в. Установлено, что развитие наклонной трещины происходит от внутренней грани опорной площадки до внешней грани загрузочной пластины. Причем данная картина трещинообразования независима от уровня продольного обжатия и характера опирания (жесткое/податливое) образца. Вместе с тем стоит отметить, что при увеличении уровня продольного обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ наклонная трещина от растянутой зоны элемента развивается под более острым углом, тогда как развитие трещины в сжатой зоне, напротив, происходит под более тупым углом к продольной оси элемента. При испытании образцов на жестких (БДЖ^(н)) опорах, вне зависимости от уровня продольного обжатия, развитие наклонных трещин происходит на всю высоту сечения по длине пролета среза. В случае испытания образцов на податливых опорах, сработавших в пластической стадии (БДУП^(н)) без продольного обжатия, видно, что наклонная трещина развивается на 2/3 и 3/4 высоты сечения соответственно. При повышении уровня продольного обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ для образцов, испытанных на пластических опорах (БДУП-04^(н)), образование трещин не произошло.

Анализ деформаций поперечной арматуры (рис. 9–12) показал, что наибольшие значения наблюдаются на участках, пересекаемых наклонной трещиной. Стоит отметить, что для образцов, испытанных на жестких (БДЖ^(н)) опорах, деформации в арматуре превысили значения, соответствующие напряжениям условного предела текучести арматурной стали ($\sigma_{0,2}$). Для образцов, испытанных на пластических (БДУП^(н)) опорах, можно установить, что при повышении обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ снижение деформаций составило 97 %.

Анализ влияния податливости опор показал, что при одинаковом уровне продольного обжатия, равном $N = 0,4N_{\max}$, снижение деформаций поперечной арматуры при пластическом опирании (БДУП^(н)) относительно конструкций, испытанных на жестких (БДЖ^(н)) опорах, составило 97,5 %. Установлено, что наибольшие деформации поперечной арматуры в наклонных сечениях возникают при испытании образцов без продольного обжатия $N = 0$ для балок, испытанных на жестких (БДЖ-0^(н)) опорах, и превышают значение $350 \cdot 10^{-5}$ ед.о.д (рис. 9). Наименьшие значения деформации поперечной арматуры в наклонных сечениях зафиксированы при испытании образцов на пластических опорах при уровне продольного обжатия $N = 0,4N_{\max}$ (БДУП-04^(н)), составляющие $4,5 \cdot 10^{-5}$ ед.о.д (рис. 12).

Выводы

1. Установлено, что при испытании образцов на податливых опорах прослеживается увеличение времени сопротивления конструкций по наклонным сечениям по отношению к образцам на жестких опорах. При напряжениях в поперечной арматуре, не превышающих условного предела текучести (состояние 1^а), данное увеличение находится в пределах от 2,5 до 3 раз. При работе поперечной арматуры за условным пределом текучести (состояние 1^б) – в 2 раза. Такой характер деформирования конструкции отмечается для всех рассматриваемых уровней продольного обжатия ($N = 0$; $N = 0,2N_{\max}$; $N = 0,4N_{\max}$).

2. Экспериментально получено, что при поперечном изгибе с увеличением продольного обжатия до уровня $N = 0,4N_{\max}$ происходит уменьшение деформаций поперечной арматуры для конструкции, работающей в условно-упругой стадии на 55 %, и на 97 % при полном исчерпании несущей способности элемента. Установлено, что применение упругопластических податливых опор в сравнении с жестким опиранием при одинаковом уровне продольного обжатия и внешнем динамическом воздействии при работе конструкции в условно-упругой стадии приводит к снижению деформаций поперечной арматуры до 95 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poonaya S., Thinvongpituk C., Teeboonma U. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending // *Proceedings of WASET*. 2007. № 26. P. 329–334.
2. Mata P., Barbat A., Oller S., Boroschek R. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of rc structures with energy dissipators // *Arch. comput. methods eng.* 2008. № 15. P. 489–539.
3. Olabi A., Morris E., Hashmi M. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis // *Journal of Thin-Walled Structures*. 2008. № 45. P. 706–726.
4. Marzbanrad J., Mehdikhanlo M., Saeedi Pour A. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading // *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 2009. № 33. P. 159–166.
5. Расторгуев В.С. Применение динамических гасителей колебаний при взрывных воздействиях // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2009. № 1. С. 50–57.
6. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading / II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists «Advanced Materials in Technology and Construction». 2015. № 1698.
7. Chiaia B., Kumpyak O.G., Placidi L., Maksimov V.B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading // *Engineering Structures*. 2015. № 96. P. 88–99.
8. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Deformability of oblique section of RC beams on yielding supports under dynamic impact / IV International Young Researchers Conference «Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects». 2017. № 1800.
9. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading // *IJCCSE*. 2017. 13(4). P. 103–113.
10. Kumpyak O., Galyautdinov Z. Deformation of reinforced concrete plates on yielding supports under dynamic impact // *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2017. I. 1. P. 28–34.
11. Galyautdinov Z., Kumpyak O. Design of reinforced concrete beams on yielding supports under short-term dynamic loading // *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2019. I. 4. P. 63–70.
12. Tonkikh G., Kumpyak O., Galyautdinov Z. Design of civil defense constructions on yielding supports in the form of crushable inserts with ring cross-sections // *Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2020. V. 17. I. 4. P. 94–97.

REFERENCES

1. Poonaya S., Thinwongpituk C., Teeboonma U. An analysis of collapse mechanism of thin-walled circular tubes subjected to bending. *Proceedings of WASET*. 2007. No. 26. Pp. 329–334.
2. Mata P., Barbat A., Oller S., Boroschek R. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of RC structures with energy dissipators. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2008. No. 15. Pp. 489–539.
3. Olabi A., Morris E., Hashmi M. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. *Journal of Thin-Walled Structures*. 2008. No. 45. Pp. 706–726.
4. Marzbanrad J., Mehdikhanlo M., Saeedi Pour A. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2009. No. 33. Pp. 159–166.
5. Rastorguev V.S. Primenenie dinamicheskikh gasitelei kolebanii pri vzryvnykh vozddeistviyakh [Application of dynamic vibration dampers under explosive loads]. *Building Mechanics and Analysis of Structures*. 2009. No. 1. Pp. 50–57.
6. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. In: *Proc. 2nd All-Russ. Sci. Conf. of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction"*. 2015. No. 1698.
7. Chiaia B., Kumpyak O.G., Placidi L., Maksimov V.B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*. 2015. No. 96. Pp. 88–99.
8. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Deformability of oblique section of RC beams on yielding supports under dynamic impact. In: *Proc. 4th Int. Conf. of Young Researchers "Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects"*. 2017. No. 1800.
9. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading. *IJCCSE*. 2017. V. 13. No. 4. Pp. 103–113.
10. Kumpyak O., Galyautdinov Z. Deformirovanie zhelezobetonnykh plit na podatlivykh oporakh pri dinamicheskikh vozddeistviyakh [Deformation of reinforced concrete plates on yielding supports under dynamic impact]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2017. No. 1. Pp. 28–34. (rus)
11. Galyautdinov Z., Kumpyak O. Raschet zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength analysis of reinforced concrete beams on yielding supports under dynamic load]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2019. No. 4. Pp. 63–70. (rus)
12. Tonkikh G., Kumpyak O., Galyautdinov Z. Raschet prochnosti zashchitnykh sooruzhenii grazhdanskoj oborony na podatlivykh oporakh v vide sminaemykh vstavok kol'tseвого secheniya [Design of civil defense constructions on yielding supports as crumple inserts with ring cross-sections]. *Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2020. V. 17. No. 4. Pp. 94–97. (rus)

Сведения об авторах

Кумпяк Олег Григорьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ogkumpyak@yandex.ru

Мецеулов Никита Владимирович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nikita.mesheulov@mail.ru

Authors Details

Oleg. G. Kumpyak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ogkumpyak@yandex.ru

Nikita. V. Meshcheulov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nikita.mesheulov@mail.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 669.24'783:539.389.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-122-132

*Ю.А. АБЗАЕВ, С.В. КОРОБКОВ, Л.А. АНИКАНОВА, В.А. СТАРЕНЧЕНКО,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАТАЦИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ВОДЫ*

Аннотация. Гидратация портландцемента в обычных условиях представляет сложную проблему. Детальное описание гидратационных процессов твердения включает в себя проблемы растворения клинкеров, диффузионные процессы, поверхностные явления на зародышах новых фаз, количественный состав твердого вещества и рост продуктов гидратации, пористой структуры, влаги в зависимости от времени твердения и водоцементного отношения. Термодинамическое моделирование гидратации портландцементов в рамках модели Lothenbach позволяет осуществить в значительной мере решение указанных проблем. В программном комплексе GEMs оценивается в равновесных условиях количественное содержание как исходного клинкера, так и продуктов гидратации (цементный камень, портландит и т. д.) в течение длительного времени.

В статье представлены результаты моделирования содержания фаз в процессе гидратации портландцемента в программе GEMs в рамках модели В. Lothenbach при отсутствии минеральных добавок calcite, lime, anhydrite, gypsum, hemihydrate, K₂SO₄. Водоцементное отношение было выбрано равным 0,3; 0,4 и 0,5.

Установлено, что к конечным доминирующим продуктам относятся гель CSHQ сложного состава, portlandite, нерастворимые клинкерные минералы, а также hydrogarnet, monosulfate, влага, распределенная в пористом пространстве, эттрингит отсутствует. Определено, что доля пористого пространства возрастает с увеличением водосодержания и даже после 1250 дней твердения вклад нерастворимых клинкеров составляет 20–25 г среди 150 г гидратированного портландцемента.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, гидратация портландцемента, водоцементное отношение

Для цитирования: Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Аниканова Л.А., Старенченко В.А. Термодинамическое моделирование гидратации портландцемента с разным содержанием воды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 122–132.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-122-132

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2020-0004).

*Yu.A. ABZAEV, S.V. KOROBKOV, L.A. ANIKANOVA, V.A. STARENCHENKO,
Tomsk State University of Architecture and Building*

THERMODYNAMIC SIMULATION OF PORTLAND CEMENT HYDRATION WITH DIFFERENT WATER CONTENT

Abstract. Hydration of Portland cement in normal conditions is a complex problem. A detailed description of the hydration process includes the clinker dissolution, diffusion processes, surface phenomena on the nuclei of new phases, quantitative composition of the solid matter and growth of hydration products, porous structure, humidity depending on the hardening time and water/cement ratio. Thermodynamic modeling of Portland cement hydration based on the Lothenbach model allows solving these problems to a large extent. Using GEMS software, thermodynamic simulation allows detecting the amount of both initial clinker and hydration products such as cement paste, ettringite, Portlandite, and others for a long period of time.

The paper presents the simulation results of the phase content during Portland cement hydration based on the Lothenbach model, in the absence of such mineral additives as calcite, lime, anhydrite, gypsum, hemihydrate, K_2SO_4 . The water/cement ratio is 0.3, 0.4 and 0.5.

It is found that the final dominant products include CSH gel of a complex composition, portlandite, insoluble clinker minerals as well as hydrogarnet, monosulfate, humidity distributed in the porous space; ettringite is absent. It is determined that the fraction of the porous space increases with increasing water content and even after 1250 days of hardening the contribution of insoluble clinkers is 20–25 g among 150 g of hydrated Portland cement.

Keywords: thermodynamic modeling, Portland cement hydration, water/cement ratio

For citation: Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Anikanova L.A., Starenchenko V.A. Termodinamicheskoe modelirovanie gidratatsii portlandtsementa s raznym soderzhaniiem vody [Thermodynamic simulation of Portland cement hydration with different water content]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 122–132. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-122-132

Введение

Бетонные изделия эксплуатируются в разнообразных внешних условиях: влажностной среды, градиентов температур, тепломассопереноса, особенностей требований прочностных характеристик и т. д. В соответствии со служебными задачами, внешними условиями эксплуатации портландцементов на цементных заводах указываются паспортные характеристики и содержание исходных компонентов. Приведенных данных, однако, как правило, недостаточно для оценки количественного содержания основных фаз цементного камня и, следовательно, интенсивности накопления прочностных, служебных характеристик за определенный период времени. Мольное содержание минералов может различаться в цементах, изготовленных на разных заводах. Может различаться также состав и содержание продуктов гидратации вследствие разной доли минеральных добавок и воды в замесе. Учет факторов, определяющих гидратацию цементов, представляет сложную проблему, решение которой экспериментальными методами затруднительно. Определенный интерес вызывает численное изучение содержания основных фаз цементного камня и других продуктов в процессе гидратации, формирования доли пористого пространства, содержания влаги в порах.

Представляется актуальным решение указанных задач на основе термодинамического подхода, реализованных В. Lothenbach [1–10] в программном

комплексе GEMs [11–13]. В комплексе GEMs вблизи равновесия цементной системы рассматривается баланс растворения клинкерных фаз, образование твердых растворов конечных продуктов на основе минимизации энергии Гиббса и базы термодинамических характеристик отдельных фаз на различных стадиях твердения. Объектом исследования был выбран портландцемент, изготовленный на Тимлюйском цементном заводе, к особенностям которого относится отсутствие некоторых добавок в клинкере, в частности calcite, lime, anhydrite, gypsum, hemihydrate, K_2SO_4 .

Целью работы в рамках термодинамического подхода является исследование количественного содержания продуктов гидролиза, гидратации портландцемента без минеральных добавок с разным содержанием воды в пределах 1250 дней, а также определение количественного содержания исходных клинкерных фаз, влаги, пористых структур, состава и содержания продуктов гидратации в процессе реакции и на конечном этапе.

Материальная и модельная аппроксимация

В портландцементных, как правило, кроме основных клинкерных компонентов присутствуют также добавки gypsum, anhydrite, hemihydrate, calcite, оксид кальция, магнезия, Na- и K-sulphates. В настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран портландцемент Тимлюйского цементного завода, в котором присутствуют не все из перечисленных минералов. Было проведено термодинамическое моделирование гидратации портландцемента в программном комплексе GEMs [11] при комнатной температуре. В исходном состоянии в клинкере присутствуют основные минералы: силикаты кальция, алюминат и алюмоферрит. Для портландцемента известен химический состав: SiO_2 (20,47 масс. %); Al_2O_3 (4,87 масс. %); Fe_2O_3 (4,04 масс. %); CaO (63,47 масс. %); MgO (1,64 масс. %); Na₂O (0,239 масс. %); K₂O (0,461 масс. %); SO_3 (2,67 масс. %). Известно также минералогическое содержание клинкера: alite (C_3S , 67 %), belite (C_2S , 12 %), aluminate (C_3A , 6,2 %), aluminoferrite (C_4AF , 12 %). В программе GEMs исследуется химическое взаимодействие клинкерных минералов с водой в рамках термодинамического подхода в условиях минимума свободной энергии. В GEMs возможно рассмотрение входных данных как на основе химического, так минералогического составов клинкера. Состав и накопление фаз осуществляется с помощью термодинамического моделирования растворения, гидратации продуктов твердой фазы, ионного состава водной среды, содержания газов на основе термодинамических данных CEMDATA 18 [14]. Расчеты проводятся как в условиях образования конечных продуктов однократным моделированием, так и поэтапным, пошаговым накоплением продуктов в зависимости от времени (степени гидратации) в модели Lothenbach [1, 2, 15, 16].

Результаты

В модели [1] реализовано детальное активационное накопление продуктов гидратирования на основе полуэмпирических зависимостей Parrot-Killox. В настоящей работе с помощью GEMs реализованы оба этапа моделирования гидратации Тимлюйского портландцемента. Исходные данные клинкерного состава, содержания влаги и минеральных добавок масштабировались в обла-

сти 100 г (г/100 г). Для расчетов был использован минералогический состав портландцемента. Дополнительно в модели учтен также кислород O_2 (0,1 г). Рассмотрено разное содержание воды H_2O , в частности 30, 40 и 50 г соответственно. Расчеты проводились при комнатной температуре $T = 20^\circ C$. В табл. 1 приведены результаты оценки содержания фаз после однократного моделирования, т. е. результаты расчетов содержания только конечных продуктов гидратации. Был получен состав и количественное содержание фаз в твердом, жидком и газообразном состояниях (в г) гидратированного портландцемента (ГПЦ) с содержанием воды 30 (а); 40 (б); 50 (в) г. Для удобства модели обозначены как ГПЦ-1, ГПЦ-2 и ГПЦ-3 соответственно. Из полученных результатов следует, что с увеличением исходного содержания влаги доля газов мало меняется.

Таблица 1

**Содержание продуктов гидратации портландцемента
с разным агрегатным состоянием после однократного моделирования**

Фазы	Химическая формула	ГПЦ-1, содержание фаз, г	ГПЦ-2, содержание фаз, г	ГПЦ-3, содержание фаз, г
aq_gen	H_2O	–	3,982	13,763
gas_gen	O_2	0,1	0,0999	0,0995
CSHQ	–	50,161	69,063	69,520
SO ₄ _OH_AFm	$(CaO)_3(CaCO_3)Al_2O_3 \cdot 12H_2O$	14,695	23,418	23,924
Belite	$2CaO \cdot SiO_2$	12,281	–	–
Hydrogarnet	C_3AH_6	5,829	0,306	–
Hydrogarnet	$C_3FS_{1,34}H_{3,32}$	11,562	11,562	11,265
Portlandite	$Ca(OH)_2$	32,126	30,080	29,664
arcanite	K_2SO_4	0,5143	0,0221	–
OH-hydratalcite	$Mg_4Al_2(OH)_{0,1413}H_2O$	3,822	3,822	3,822
thenardite	Na_2SO_4	0,967	–	–

Обнаружено, что в моделях ГПЦ-2, ГПЦ-3 вода присутствует в пористом пространстве (Aqueous), а в модели ГПЦ-1, наоборот, отсутствует, что свидетельствует о том, что все молекулы воды внедрены в решетки твердых фаз, т. е. отсутствует связанная и свободная влага в гидратированном цементе. В модели ГПЦ-3 вода в порах существенно превосходит содержание воды в модели ГПЦ-2. Анализ продуктов гидратации твердой фазы показал, что ее накопление оказывается немонотонным. В самом деле, наибольшее содержание обнаружено в модели ГПЦ-2. Использование воды 50 г приводит к росту пористого пространства, но не приводит к увеличению содержания твердой фазы. Анализ фазового состава твердой фазы показал, что в фазе доминируют кальций силикат гидрат (CSHQ) и портландит. Причем в CSHQ присутствуют фазы как на дженитовой, так и на тоберморитовой основах, которые характеризуются разным отношением (основностью) Ca/Si (табл. 2).

Таблица 2

Состав геля CSHQ

Фаза	Модификации	Концентрация, г		
		ГПЦ-1	ГПЦ-2	ГПЦ-3
CSHQ	CSH-JenD (CaO) _{1,5} (SiO ₂) _{0,6667} (H ₂ O) _{2,5}	0,310	0,394	0,407
	CSH-JenH (CaO) _{1,333} (SiO ₂) ₁ (H ₂ O) _{2,1667}	0,439	0,298	0,276
	CSH-TobD [(CaO) _{1,25} (SiO ₂) ₁ (H ₂ O) _{2,75}] _{0,6667}	0,230	0,293	0,3023
	CSH-TobH (CaO) _{0,6667} (SiO ₂) ₁ (H ₂ O) _{1,5}	0,0205	0,014	0,0130

В рамках модели установлено, что содержание белита в связи с низкой скоростью реакции (по сравнению с C₃S) или неизменно, или мало меняется. Из результатов следует, что увеличение содержания воды приводит к разнонаправленному накоплению отдельных фаз цементной пасты CSHQ. Обнаруживается рост количества фаз CSH-JenD, CSH-JenD с высокой основностью и снижение CSH-JenH, CSH-TobD (табл. 2). Заметную часть твердой фазы составляют hydrogarnet (C₃АН₆), твердый раствор кремнистого гидрограната C₃FS_{1,34}H_{3,32}, а также AFm фаза – SO₄_OH_AFm (см. табл.1). Причем содержание AFm фазы возрастает с увеличением водосодержания, а hydrogarnet, наоборот, существенно снижается. Среди твердых продуктов гидратации обнаруживаются в небольшом количестве также thenardite – безводный сульфат натрия (Na₂SO₄) и arcanite – сульфат калия (K₂SO₄), содержание которых резко снижается с ростом водосодержания.

Определение основных фаз, полученных после расчетов одноэтапной гидратации (одионый процесс), позволяет записать уравнения растворения клинкеров, накопления продуктов гидратации в программном комплексе GEMs [11, 14]. Подробное описание используемых полуэмпирических соотношений обсуждается в работе [16].

Было рассмотрено накопление следующих продуктов гидратации трех агрегатных состояний, находящихся вблизи термодинамического равновесия: aqua, gas, CSHQ, SO₄_OH_AFm, C₃АН₆, C₃FS_{1,34}H_{3,32}, portlandite, arcanite, OH-hydrogarnet. Были выполнены расчеты ионного содержания свободной влаги (aqua), газа (gas), твердых выделений на каждом шаге накопления вышеперечисленных фаз. Зависимость содержания клинкерных фаз alite, belite, ferrite, aluminate от времени гидратации оценивалась в рамках модели Lothenbach [1, 2]. Предполагалось, что свободная влага заполняет объем пор портландцемента. На рис. 1, 2 приведены данные о содержании всех фаз в портландцементе в зависимости от времени гидратирования, причем процесс рассматривается в течение 1250 дней.

Из анализа данных, представленных на рис. 1 и 2, следует, что к доминирующим продуктам относятся гель CSHQ, портландит, существенный рост которых начинается с ~ 0,05 ч (~10^{-1,17} дня). Меньшую долю составляют твердые

фазы hydrogarnet (C_3AH_6), OH-hydrotalcite, monosulfate ($C_3ACaSO_4 \cdot 12H_2O$) и $C_3FS_{0,84}H_{4,32}$. Причем в совокупности масса твердой фазы практически не изменяется в портландцементе с разным водосодержанием, возрастает лишь масса жидкости, находящейся в пористом пространстве. Доля влаги в конечном продукте возрастает с увеличением водосодержания в исходном растворе. Отсюда следует, что даже после 1250 дней твердения избыточная влага в исходной цементной пасте стимулирует в основном рост пористых структур и, следовательно, менее плотный бетон.

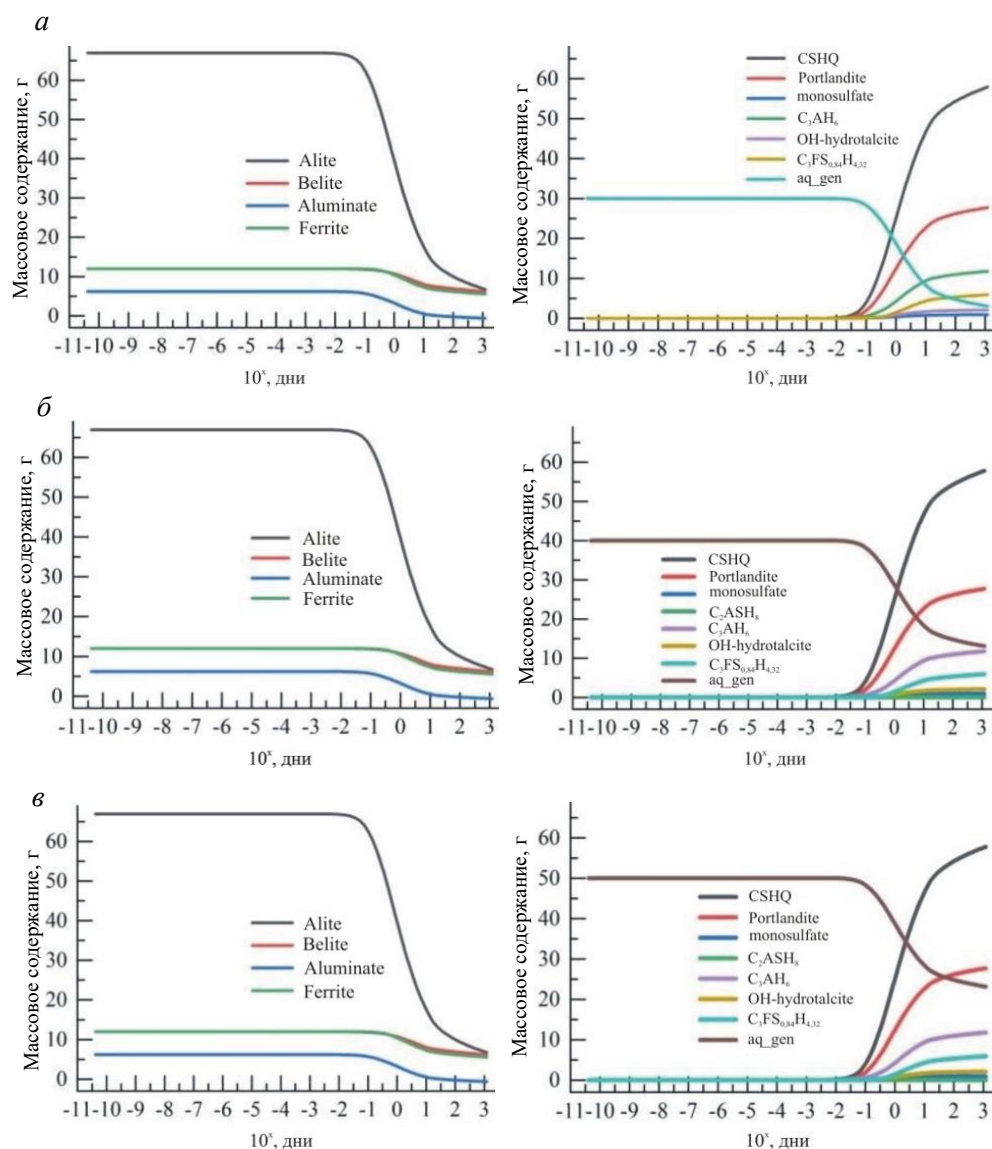


Рис. 1. Растворение клинкерных фаз и накопление продуктов в процессе гидратации в течение 100 дней в портландцементе ГПЦ-1 (а), ГПЦ-2 (б) и ГПЦ-3 (в) с содержанием 30, 40 и 50 г воды

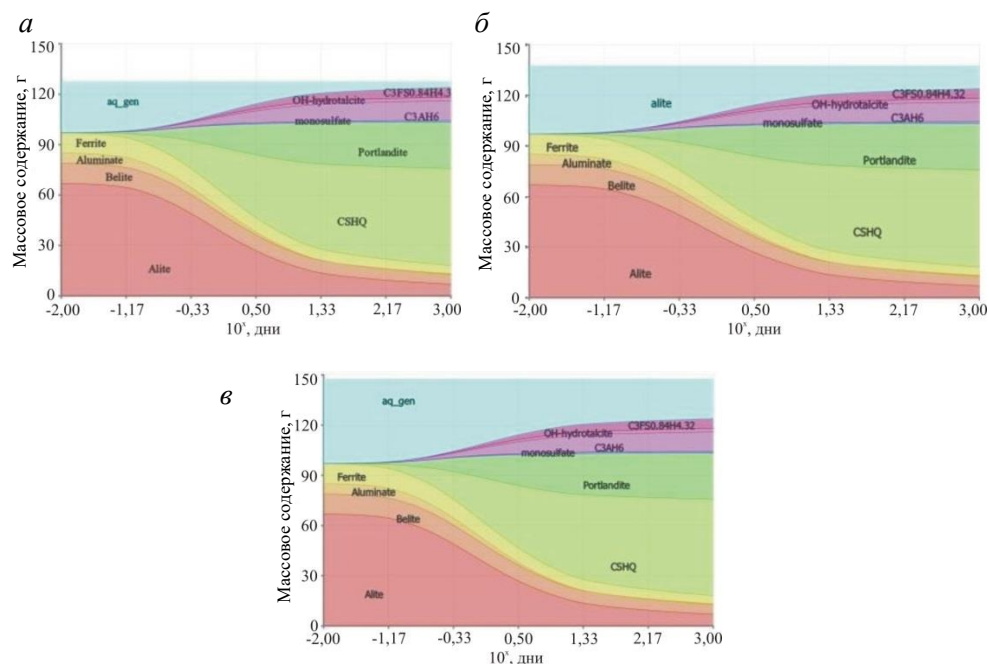


Рис. 2. Кумулятивное растворение клинкеров и накопление продуктов гидратации в портландцементе ГПЦ-1 (а), ГПЦ-2 (б) и ГПЦ-3 (в) в течение 1000 дней с содержанием 30, 40 и 50 г воды

На рис. 1 и 2 указано также растворение клинкерных минералов в зависимости от времени гидратации. За указанный период существенно снижается доля alite, ferrite и aluminat, при этом доля belite снижается в меньшей степени. Алуминат практически полностью растворяется. Накопление портландита осуществляется только за счет снижения в основном доли alite. В конечном продукте содержание клинкерных минералов в совокупности достигает 20–25 г, не произошло их полного растворения. Разный состав воды не меняет количественное содержание продуктов, однако меняет состав продуктов. В самом деле, в портландцементе с 30 г воды нет минерала C_2ASH_8 , для которого отсутствуют условия реакции, связанные с дефицитом влаги. В других случаях в начальный момент гидратации возникает C_2ASH_8 , правда, через короткое время (1 ч) данный продукт растворяется (табл. 3). Из данных табл. 3 следует также, что разное водосодержание не оказывает влияния на скорость реакций образования продуктов и, следовательно, содержание конечных продуктов гидратации. Массы отдельных твердых продуктов одинаковы при разном содержании воды.

Таким образом, исходный минералогический состав, количественное содержание играют важную роль в формировании продуктов гидратации связующих бетонов. Показано, что к доминирующим фазам исследуемого твердеющего портландцемента относятся гель CSHQ сложного состава, portlandite, нерастворимые клинкерные минералы, а также hydrogarnet, monosulfate (фаза $SO_4\text{-OH-AFm}$), влага, распределенная в пористом пространстве. Доля пористой структуры увеличивается с ростом содержания влаги свыше 30 г.

Таблица 3

**Содержание продуктов гидратации в портландцементе
с разным водосодержанием**

Время	CSHQ	Порт- ландит	Моно- sulfate	C ₂ ASH ₈	C ₃ AH ₆	ОН- hydrotalcite	C ₃ FS _{0,84} H _{4,32}
30 г воды							
5 мин	0,003	0	0	—	0	2,260×10 ⁻⁴	0
1 ч	3,388	1,6437	0,053	—	0,517	0,105	0,056
10 ч	23,440	11,642	0,374	—	3,904	0,790	1,277
28 дн	34,892	17,186	0,826	—	10,333	1,853	4,917
1250 дн	57,891	27,720	0,933	—	11,790	2,100	5,904
40 г воды							
5 мин	0,002	0	0	0,0023	0	2,259×10 ⁻⁴	0
1 ч	3,388	1,628	0,053	0	0,517	0,105	0,056
10 ч	23,431	11,636	0,375	0	3,903	0,790	1,277
28 дн	34,870	17,181	0,828	0	10,331	1,853	4,917
1250 дн	57,823	27,714	0,935	0	11,787	2,101	5,904
50 г воды							
5 мин	0,002	0	0	0,00193	0	2,259×10 ⁻⁴	0
1 ч	3,388	1,613	0,054	0	0,517	0,105	0,056
10 ч	23,426	11,628	0,375	0	3,903	0,791	1,277
28 дн	34,857	17,176	0,830	0	10,330	1,853	4,917
1250 дн	57,783	27,709	0,937	0	11,785	2,101	5,904

Отсутствие традиционно используемых добавок, в частности calcite, lime, anhydrite, gypsum, hemihydrate, K₂SO₄, не привело к существенному изменению доли основных продуктов: CSHQ и portlandite. Однако в связующей смеси бетонов даже после значительного периода твердения обнаруживаются нерастворимые клинкерные минералы, достигающие 5-й части общего содержания, и отсутствует эттрингит.

Заключение

Таким образом, исходный минералогический состав и количественное содержание играют важную роль в формировании продуктов гидратации связующих бетонов. Показано, что к доминирующим фазам исследуемого твердеющего портландцемента относятся: гель CSHQ сложного состава, portlandite, нерастворимые клинкерные минералы, а также hydrogarnet, monosulfate (фаза SO₄_OH_AFm), влага, распределенная в пористом пространстве. Доля пористой структуры возрастает с увеличением содержания влаги свыше 30 г. Отсутствие традиционно используемых добавок, в частности calcite, lime, anhydrite, gypsum, hemihydrate, K₂SO₄, не привело к существенному изменению доли основных продуктов: CSHQ и portlandite. Однако в связующей смеси бетонов

даже после значительного периода твердения обнаруживаются нерастворимые клинкерные минералы, достигающие 5-й части общего содержания, и отсутствует этtringит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lothenbach B., Winnerfeld F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement // *Journal of Cement and Concrete Research*. 2006. V. 36. № 2. P. 209–226.
2. Lothenbach B., Le Saout G., Gallucci E., Scrivener K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements // *Cement and Concrete Research*. 2008. V. 38. P. 848–860.
3. Lothenbach B., Le Saout G., Ben Haha M., Figi R., Wieland E. Hydration of a low-alkali CEM III/B–SiO₂ cement (LAC) // *Journal of Cement and Concrete Research*. 2012. V. 42. № 2. P. 410–423.
4. Ben Haha M., De Weerd K., Lothenbach B. Quantification of the degree of reaction of fly ash // *Journal of Cement and Concrete Research*. 2010. V. 40. № 11. P. 1620–1629.
5. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags // *Journal of Cement and Concrete Research*. 2011. V. 41. № 3. P. 301–310.
6. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Müller C.J. Beneficial use of limestone filler with calcium sulfoaluminate cement // *Construction and Building Materials*. 2012. V. 26. № 1. P. 619–627.
7. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Le Saout G., Müller C.J., Famy C. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement-calcium sulfoaluminate clinker-calcium sulphate binders // *Cement and Concrete Composites*. 2011. V. 33. № 5. P. 551–561.
8. Winnefeld F., Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements — Experimental findings and thermodynamic modelling // *Journal of Cement and Concrete Research*. 2010. V. 40. № 8. P. 1239–1247.
9. De Weerd K., Ben Haha M., Le Saout G., Kjellsen K.O., Justnes H., Lothenbach B. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash // *Journal of Cement and Concrete Research*. 2011. V. 41. № 3. P. 279–291.
10. Kunther W., Skibsted J., Lothenbach B. Influence of the Ca/Si ratio of the C–S–H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure // *Cement and Concrete Research*. 2015. V. 69. P. 35–49.
11. *Gibbs Energy Minimization Software for Geochemical Modeling*. URL: <https://gems.web.psi.ch>
12. Kulik D.A., Wagner T., Dmytrieva S.V., Kosakowski G., Hingerl F.F., Chudnenko K.V., Berner U. GEM-Selektor geochemical modeling package: revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes // *Computational Geosciences*. 2013. V. 17. № 1. P. 1–24.
13. Wagner T., Kulik D.A., Hingerl F.F., Dmytrieva S.V. GEM-Selektor geochemical modeling package: TSolMod library and data interface for multicomponent phase models // *Canadian Mineralogist*. 2012. V. 50. P. 1173–1195.
14. Matschei T. Thermodynamics of Cement Hydration. Thesis. Doctor of Philosophy // University of Aberdeen Department of Chemistry. 2007. December. 222 p.
15. Zhuangzhuang Liu, Aimin Sha, Liqun Hu, Yongwei Lu, Wenxiu Jiao, Zheng Tong, Jie Gao. Kinetic and thermodynamic modeling of Portland cement hydration at low temperatures // *Journal of Chemical Papers*. 2017. V. 71. № 4. P. 741–751.
16. Abzaev Yu.A., Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Gauss K.S. Phase analysis of hydrated Portland cement // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 193. 012001.

REFERENCES

1. Lothenbach B., Winnerfeld F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2006. V. 36. No. 2. Pp. 209–226.
2. Lothenbach B., Le Saout G., Gallucci E., Scrivener K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*. 2008. V. 38. Pp. 848–860.

3. Lothenbach B., Le Saout G., Ben Haha M., Figi R., Wieland E. Hydration of a low-alkali CEM III/B–SiO₂ cement (LAC). *Journal of Cement and Concrete Research*. 2012. V. 42. No. 2. Pp. 410–423.
4. Ben Haha M., De Weerd K., Lothenbach B. Quantification of the degree of reaction of fly ash. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2010. V. 40. No. 11. Pp. 1620–1629.
5. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2011. V. 41. No. 3. Pp. 301–310.
6. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Müller C.J. Beneficial use of limestone filler with calcium sulfoaluminate cement. *Construction and Building Materials*. 2012. V. 26. No. 1. Pp. 619–627.
7. Pelletier-Chaignat L., Winnefeld F., Lothenbach B., Le Saout G., Müller C.J., Famy C. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement-calcium sulfoaluminate clinker-calcium sulphate binders. *Cement and Concrete Composites*. 2011. V. 33. No. 5. Pp. 551–561.
8. Winnefeld F., Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements – Experimental findings and thermodynamic modelling. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2010. V. 40. No. 8. Pp. 1239–1247.
9. De Weerd K., Ben Haha M., Le Saout G., Kjellsen K.O., Justnes H., Lothenbach B. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Journal of Cement and Concrete Research*. 2011. V. 41. No. 3. Pp. 279–291.
10. Kunther W., Skibsted J., Lothenbach B. Influence of the Ca/Si ratio of the C–S–H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure. *Cement and Concrete Research*. 2015. V. 69. Pp. 35–49.
11. Gibbs Energy Minimization software for geochemical modeling. Available: <https://gems.web.psi.ch>
12. Kulik D.A., Wagner T., Dmytrieva S.V., Kosakowski G., Hingerl F.F., Chudnenko K.V., Berner U. GEM-Selektor geochemical modeling package: revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes. *Computational Geosciences*. 2013. V. 17. No. 1. Pp. 1–24.
13. Wagner T., Kulik D.A., Hingerl F.F., Dmytrieva S.V. GEM-Selektor geochemical modeling package: TSolMod library and data interface for multicomponent phase models. *Canadian Mineralogist*. 2012. V. 50. Pp. 1173–1195.
14. Matschei T. Thermodynamics of cement hydration. PhD Thesis. University of Aberdeen Department of Chemistry. 2007. 222 p.
15. Zhuangzhuang Liu, Aimin Sha, Liqun Hu, Yongwei Lu, Wenxiu Jiao, Zheng Tong, Jie Gao. Kinetic and thermodynamic modeling of Portland cement hydration at low temperatures. *Journal of Chemical Papers*. 2017. V. 71. No. 4. Pp. 741–751.
16. Abzaev Yu.A., Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Gauss K.S. Phase analysis of hydrated Portland cement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 193. 012001.

Сведения об авторах

Абзаев Юрий Афанасьевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, abzaev2010@yandex.ru

Коробков Сергей Викторович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, korobkov_1973@mail.ru

Аниканова Любовь Александровна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kafedra_smit@tsuab.ru

Старенченко Владимир Александрович, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, star@tsuab.ru

Authors Details

Yurii A. Abzaev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, abzaev2010@yandex.ru

Sergei V. Korobkov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, korobkov_1973@mail.ru

Lyubov A. Anikanova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kafedra_smit@tsuab.ru

Vladimir A. Starenchenko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, star@tsuab.ru

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.31

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-133-144

Д.А. СУГЛОБОВ¹, Е.И. ВЯЛКОВА¹, Е.Ю. ОСИПОВА²,

¹Тюменский индустриальный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ КАНАЛИЗАЦИИ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Территории Арктических зон России расположены, как правило, в местах распространения многолетнемерзлых грунтов, которые намного осложняют эксплуатацию и строительство сетей канализации в населенных пунктах. Для обеспечения эффективного энергосбережения при сохранении степени надежности функционирования системы предлагаются к использованию в проектировании варианты теплотехнического расчета участков трубопроводов напорной и самотечной хозяйственно-бытовой канализации.

По результатам расчетов разработаны диаграмма и графики, позволяющие достаточно быстро и точно определить параметры теплоизоляции и способы поддержания положительных температур сточных вод при их транспортировке в холодное время года. Полученные расчетные данные помогут на практике выбрать наиболее энергосберегающий и надежный вариант проектного решения. Рекомендации, разработанные на основе теплотехнического анализа, помогут принять верное инженерное решение при проектировании сетей канализации в специфических условиях севера.

Ключевые слова: сети канализации, многолетнемерзлые грунты, теплотехнический расчет, теплоизоляция, энергосбережение

Для цитирования: Суглобов Д.А., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Особенности проектирования сетей канализации в арктических условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 133–144.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-133-144

D.A. SUGLOBOV¹, E.I. VYALKOVA¹, E.YU. OSIPOVA²,

¹Industrial University of Tyumen,

²Tomsk State University of Architecture and Building

WASTEWATER SYSTEM DESIGN IN ARCTIC CONDITIONS

Abstract. Purpose: The Arctic territories of Russia are mostly situated on the permafrost soils, which greatly complicate the service and construction of wastewater systems in urban

areas. *Design*: Options are proposed for the thermal and technical calculation of pipeline sections of the pressure and gravity domestic sewage system to ensure an effective energy saving while maintaining reliability of the system operation. *Research findings*: Diagrams are suggested to quickly and accurately determine the thermal insulation parameters and ways to maintain positive wastewater temperatures during their transportation in a cold season. *Practical implications*: The obtained data can be used to select the most energy-efficient and reliable design solution. *Originality/value*: Recommendations on the thermal analysis will help to draw the right engineering decision in designing sewerage networks in northern conditions.

Keywords: sewerage network, permafrost soil, thermal analysis, thermal insulation, energy saving

For citation: Suglobov D.A., Vyalkova E.I., Osipova E.Yu. Osobennosti proektirovaniya setei kanalizatsii v arkticheskikh usloviyakh [Wastewater system design in arctic conditions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 133–144. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-133-144

Введение

Многолетнемерзлые грунты занимают примерно одну четверть всей территории суши нашей планеты, из которых на долю территории России приходится около 65 %. При этом в Сибири площадь «вечной мерзлоты» занимает 85 %, а в Республике Саха – 95 %. При населении в Арктической зоне РФ более 2 млн чел. небольшие поселения интенсивно развивают свои инфраструктуры, включая централизованные системы водоснабжения и водоотведения [1]. В связи со сложными природными, гидрологическими и геологическими условиями, возникает необходимость в мероприятиях по предотвращению промерзания трубопроводов, транспортирующих воду. Однако себестоимость воды в северных районах в 20–30 раз выше, чем в средней полосе страны. Это связано со значительным потреблением электроэнергии на транспортирование и подогрев воды на 15–20 °С [2].

В сложившейся современной практике проектирования при разработке проектов систем водоснабжения и канализации исполнители чаще всего не делают подробных теплотехнических расчетов ввиду их сложности и отсутствия отработанной методики, а ориентируются на типовые решения. По этой причине возникают завышенные затраты на теплоизолирующие материалы, а также расход электроэнергии для поддержания сетей в рабочем состоянии или существенно снижается надежность работы инженерных систем в холодный период года. Более точные технические расчеты и обоснованные инженерные решения с точки зрения энергосбережения позволят сократить капитальные и эксплуатационные затраты строительных объектов [3].

Теплотехнический анализ систем, транспортирующих воду по трубам в условиях многолетнемерзлых грунтов, освещался в работах А.В. Гинзбурга, А.А. Кунаховича, М.М. Андрияшева, А.П. Ястребова и других ученых [2, 4–6].

Известно, что из-за наличия вечной мерзлоты и сурового климата возникает проблема обеспечения проектного расположения трубопровода. Значительная глубина (до 2 м и более) слоя сезонного оттаивания и низкая несущая способность талых грунтов повлияли на практику распространения надземных способов прокладки труб на опорах или эстакадах. Трубопровод, проложенный

над поверхностью земли, наиболее подвержен влиянию отрицательных температур по сравнению с подземным способом прокладки. Следовательно, необходимо обеспечивать надежную теплоизоляцию и эффективный обогрев труб в холодный период года [7].

В публикациях О.Г. Латуевой, М.В. Дементьевой, А.А. Курохтина и Н.Н. Хренкова [8–10] рассматриваются методы по предотвращению промерзания трубопроводов и резервуаров в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов на основании опыта проектирования и исследования реальных объектов с точки зрения технико-экономической эффективности.

Анализ систем обогрева трубопроводов показал, что экономически выгодно использовать паропровод от местных паронагнетательных установок или котельных. Если это достаточно протяженный участок трубы, то применение паропровода неэффективно. Также на слишком коротких участках целесообразно использование электрического кабеля [8].

При выборе способа надежного метода обогрева блоков канализационных насосных станций (КНС) рассматривалось два метода внутреннего поддержания тепла стоков: 1 – с помощью греющего электрокабеля; 2 – за счет водяного теплообменника. При этом учитывались следующие критерии: трудозатраты и экономичность строительства, затраты на эксплуатацию. Наиболее целесообразным оказался вариант поддержания тепла с помощью греющего электрокабеля, поскольку такое решение имеет автономный источник обогрева внутри блоков КНС, что обеспечивает дополнительный резерв и повышает надежность работы системы [9].

Н.Н. Хренков [10] провел моделирование и расчет тепловых режимов обогрева стального и пластикового трубопровода саморегулирующимися кабелями при температуре минус 40 °С. Низкая теплопроводность пластикового трубопровода в случае остановки потока вызывает перегрев воды, это может вызвать значительные деформации труб. Стальные трубы такому явлению не подвержены и работают более надежно. Но в данном случае не учитывается агрессивность сточных вод по отношению к стали, особенно при повышении температуры воды. В любом случае следует избегать перегрева системы не только с целью предупреждения высоких энергозатрат, но и по причине возможного сокращения срока исправной эксплуатации системы в целом.

В настоящей работе сделана попытка решить следующие задачи: выполнение теплотехнических расчетов трубопроводов систем водоотведения для напорных и безнапорных участков сети с использованием различных типов теплоизоляционных материалов; разработка рекомендаций для проектирования сетей водоотведения в условиях Арктики с учетом энергосбережения и надежности сооружений.

Методы и материалы

Теплотехнический расчет напорного участка сети хозяйственно-бытовой канализации принят согласно СП 61.13330.2012 [11] и основан на принципе расчета тепловых сетей. Тепловые потери через изолированную поверхность трубопроводов при надземной прокладке и при известной толщине изоляции определялись по формуле (1), а термические сопротивления по формуле (2).

$$q_L = \frac{(t_b - t_n)K}{\sum_{i=1}^n R_i^L + R_n^L}, \quad (1)$$

где K – коэффициент дополнительных потерь, учитывающий теплопотери через теплопроводные включения в теплоизоляционных конструкциях, обусловленных наличием в них крепежных деталей и опор; t_b – температура среды внутри изолируемого объекта (в данном случае – минимально допустимая температура сточной воды), °С; R_i^L – полное линейное термическое сопротивление однослойной цилиндрической изоляции, м·°С/Вт; R_n^L – линейное термическое сопротивление теплоотдаче наружной изоляции, м·°С/Вт.

$$R_{ст}^L = \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}}, \quad (2)$$

где $R_{ст}^L$ – линейное термическое сопротивление трубопровода, м·°С/Вт; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубопровода, м·°С/Вт; $\delta_{ст}$ – толщина стенки трубопровода, м.

Расчет толщины тепловой изоляции по нормированной плотности теплового потока для однослойных конструкций выполняется по формуле (3) для однослойных цилиндрических поверхностей диаметром менее 2 м:

$$\ln B = 2\pi\lambda_{из} \left[\frac{K(t_b - t_n)}{q_L^n} - R_n^L \right]. \quad (3)$$

Коэффициент дополнительных тепловых потерь K через опоры трубопроводов принимается равным 1. Приближенные значения R_n^L принимаются по табл. В.3 [12]; $\delta_{из}$ – толщина изоляции, принята по расчету исходя из толщины стенки трубы, м.

Для сравнительного анализа рассмотрены следующие случаи: а) сравнение толщины теплоизоляции для трубопровода (условный диаметр 50–200 мм) для стальных труб в ППУ-изоляции; б) сравнение материалов теплоизоляции (ППУ – пенополиуретан; ППС – экструдированный пенополистирол; СВА – стекловата марки Rockwool; МВА – минеральная вата, полуцилиндры) в зависимости от материала трубопровода (СТ – стальная труба по ГОСТ 10704–91; ПЭ – полиэтилен напорный по ГОСТ 18599–2001) при равных условных диаметрах, толщине стенок и толщине слоя изоляции ($\delta_{из} = 25$ –100 мм). Исходные данные для проектирования и теплотехнических расчетов напорного участка сети канализации надземной прокладки, расположенного в Ямало-Ненецком автономном округе, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для проектирования и расчетов [12, 13]

№ п/п	Наименование параметра	Значение, единица измерения
1	Скорость ветра	5,2 м/с
2	Температура окружающей среды минимальная	–54 °С,

Окончание табл. 1

№ п/п	Наименование параметра	Значение, единица измерения
3	Температура наиболее холодной пятидневки	–44 °С
4	Температура средняя за год	–12 °С
5	Минимальная температура сточной воды	+4 °С
6	Коэффициент дополнительных потерь	СТ – 1,2; ПЭ – 1,7
7	Коэффициент теплоотдачи изоляции	20 Вт/(м·°С)
8	Коэффициент теплопроводности для ППУ	0,025 Вт/(м·°С)
9	Коэффициент теплопроводности для ППС	0,033 Вт/(м·°С)
10	Коэффициент теплопроводности для СВА	0,044 Вт/(м·°С)
11	Коэффициент теплопроводности для МВА	0,05 Вт/(м·°С)
12	Коэффициент теплоотдачи от трубы к воде	50 Вт/(м·°С)
13	Коэффициент теплопроводности трубы СТ	80 Вт/(м·К)
14	Коэффициент теплопроводности трубы ПЭ	0,43 Вт/(м·К)

Для самотечного участка сети канализации (диаметром 150 мм с уклоном 0,008, в ППУ-изоляции толщиной 50 мм), проложенного подземным способом, теоретически исследована возможность прокладки на максимальное расстояние без какого-либо подогрева. При этом труба не промерзает на начальном участке за счет собственной температуры сточных вод. Методика расчета изложена в справочнике Ю.Я. Велли [14]. Падение температуры сточных вод по длине трубы определяется из выражений (4) и (5):

$$\log \frac{t_2^* - \frac{\lambda_m}{\lambda_r} t_r^*}{t_1^* - \frac{\lambda_m}{\lambda_r} t_r^*} = -0,43 \frac{l}{R \cdot Q \cdot \gamma \cdot C}, \quad (4)$$

$$t_{1,2}^* = t_{1,2} - t_0; \quad t_r^* = t_r - t_0, \quad (5)$$

где $t_{1,2}$ – температура жидкости в начале (15 °С) и конце (4 °С) расчетного участка соответственно, °С; t_0 – температура начала замерзания грунтовой влаги, $t_0 = -1$ °С; t_r – температура грунта на глубине заложения оси трубопровода, –16,4 °С; λ_m , λ_r – коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунта, 2,3 и 1,3 ккал/(м·ч·°С); l – длина расчетного участка, м; Q – расход жидкости, 0,54 м³/ч; γ – удельный вес жидкости, кг/м³; C – весовая теплоемкость жидкости, ккал/(кг·°С); R – суммарное сопротивление теплопередаче, ккал/(кг·°С).

Результаты исследований и обсуждение

В рамках данной работы определялись теплотери через слой изоляции (50 м) для стальных и полиэтиленовых труб (условным диаметром 80 мм, с толщиной стенки 5 мм), транспортирующих в напорном режиме сточные воды (табл. 2).

Таблица 2

Тепловые потери на 1 м трубы в теплоизоляции

Показатель	Материал труб и вид теплоизоляции							
	СТ в ППУ	ПЭ в ППУ	СТ в ППС	ПЭ в ППС	СТ в СВА	ПЭ в СВА	СТ в МВА	ПЭ в МВА
$R_{из}^L$	4,76	4,76	3,61	3,61	2,70	2,70	2,38	2,38
R_n^L	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$R_{ст}^L$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,012	$1 \cdot 10^{-4}$	0,012	$1 \cdot 10^{-4}$	0,012	$1 \cdot 10^{-4}$	0,012
q_L	11,40	11,37	14,96	14,91	19,80	19,72	22,41	22,30

Расчеты показали, что влияние материала труб на значения теплотерь незначительно, особенно если речь идет о районах Арктической зоны с низкими отрицательными температурами в зимнее время. По тепловым потерям полиэтилен себя показывает несколько лучше, чем стальной трубопровод, но отличие не превышает 1 %.

В табл. 3 предоставлены результаты расчета оптимальной толщины изоляции и её стоимости на 1 м для стальных труб диаметром 57–219 мм. В итоге оказалось, что самая дешёвая изоляция – МВА, которая на 17 % дешевле, чем изоляция ППУ; самая дорогая – СВА, которая на 40 % выше, чем изоляция ППУ. Наименьшая требуемая толщина – для теплоизоляции ППУ, которая составила от 40 до 62 мм. Самый толстый слой изоляции – из минеральной ваты, который, по расчетам, равен от 100 до 160 мм. Далее, при разработке расчетной диаграммы (рис. 1) приняты два вида теплоизоляции (ППУ и ППС) для стальных труб, как наиболее востребованные и распространенные в практике строительства в северных районах. Небольшое расхождение в теплотерях (не более 1 %) позволяет данную диаграмму применять и для расчета напорных полиэтиленовых труб.

Таблица 3

Технико-экономическое сравнение теплоизоляции стальных труб

Расчетная стоимость теплоизоляции на 1 м трубы, руб.*				
Диаметр трубы, мм	Толщина слоя изоляции, м			
	Тип теплоизоляции			
	ППУ	ППС	СВА	МВА
57	<u>160,60</u> 0,04	<u>217,77</u> 0,061	<u>235,58</u> 0,103	<u>139,02</u> 0,133
89	<u>168,04</u> 0,041	<u>215,86</u> 0,061	<u>212,95</u> 0,096	<u>118,53</u> 0,120
108	<u>253,07</u> 0,056	<u>185,78</u> 0,055	<u>171,83</u> 0,083	<u>92,00</u> 0,102
159	<u>255,76</u> 0,056	<u>326,69</u> 0,081	<u>315,29</u> 0,124	<u>172,30</u> 0,152
219	<u>295,66</u> 0,062	<u>372,22</u> 0,089	<u>349,39</u> 0,132	<u>187,45</u> 0,160

*Стоимость теплоизоляции рассчитана без учета расходных материалов (креплений, лакокрасочных покрытий, верхних покровных слоев и др.).

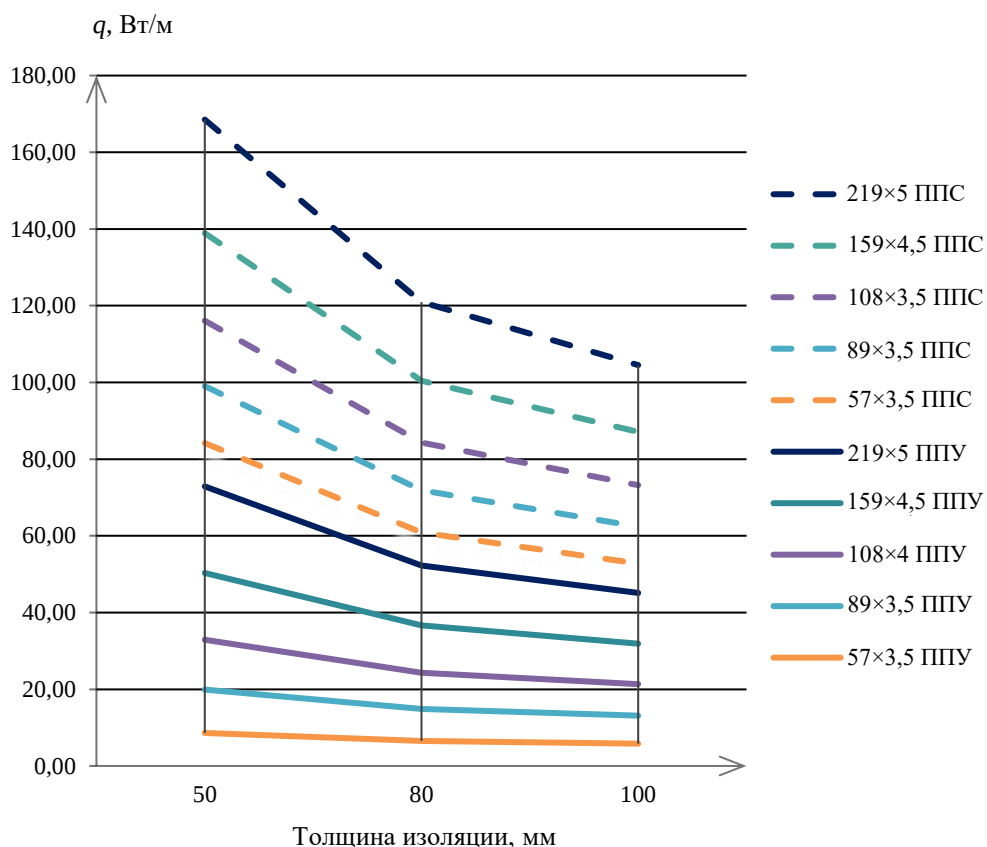


Рис. 1. Диаграмма для определения теплопотерь в стальных трубах напорной канализации в зависимости от вида и толщины теплоизоляции

Для расчета безнапорного участка сети канализации рассмотрено два случая: 1) рельеф земли абсолютно ровный, при этом глубина заложения трубы изменяется по длине соответственно уклону трубы (диаметр 150 мм, уклон 0,008; глубина деятельного слоя 2,9 м); 2) уклон поверхности земли совпадает с уклоном трубы, т. е. глубина заложения трубопровода остается постоянной на всем протяжении расчетного участка – 1 м.

Результаты расчетов сведены в табл. 4–6, в которых представлены расчетные параметры и суммарные теплопотери. На рис. 2 приведены графики изменения температуры в сети самотечной хозяйственно-бытовой канализации для двух характерных случаев устройства трубопровода. Линия падения температуры для двух случаев практически совпадает, при этом максимальное расхождение находится в пределах до 1 °С. Средняя скорость снижения температуры в трубе для первого случая на участке до 250 м составляет 0,021 °С/м; во втором случае на участке до 800 м – 0,0148 °С/м. Это подтверждает тот факт, что в случае заглубления трубы не более чем на 1 м в многолетнемерзлых грунтах температура сточных вод способна обогревать систему на начальных участках достаточно большой протяженности.

Таблица 4

**Расчетная таблица изменения температуры сточной воды от выпуска
при идеально ровной поверхности земли**

[illegible]

Таблица 5

Расчетная таблица изменения температуры сточной воды от выпуска при равных уклонах поверхности земли и трубы (при длине до 200 м)

Расчетные параметры	Протяженность трубопровода, м						
	10	40	70	100	130	160	200
$t_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$	15,00	14,79	14,24	13,71	13,18	12,66	12,15
$R_t, \text{ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	0,38	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
$R_{\text{из}}, \text{ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	3,55	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
$R_{\text{общ}}, \text{ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	3,93	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
$t_2, ^\circ\text{C}$	14,80	14,24	13,71	13,18	12,66	12,15	11,48
$q, \text{Вт/м}$	12,81	11,67	11,47	11,27	11,07	10,88	10,70

Таблица 6

**Расчетная таблица изменения температуры сточной воды
при равных уклонах поверхности земли и трубы (при длине от 250 до 800 м)**

[illegible]

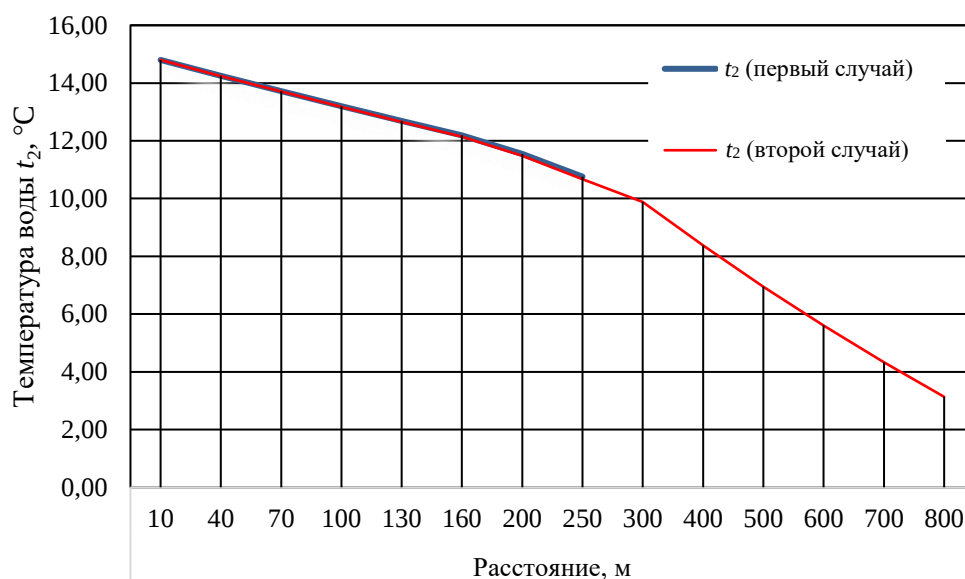


Рис. 2. Графики изменения температуры в сети самотечной хозяйственно-бытовой канализации для двух случаев:

1 – ровный рельеф земли; 2 – уклон земли равен уклону трубы

Согласно проведенным расчетам, доказано, что начальные участки труб внутриквартальной самотечной сети хозяйственно-бытовой канализации от выпуска на протяжении до 250 (при неизменном уклоне поверхности земли, до максимально допустимой глубины заложения деятельного слоя 2,9 м) и до 700 м (если глубина заложения трубы не менее 1 м, минимальная температура $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$) можно прокладывать без дополнительного обогрева в теплоизоляции ППУ (50 мм). На данном участке температура сточной воды снизится с $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, но не замерзнет. Это позволит существенно сэкономить энергозатраты на работу электрокабеля или другой системы искусственного обогрева трубопровода.

На практике необходимо все же предусмотреть резервный сброс горячей воды в ночное время на начальном участке, чтобы исключить промерзание, когда расход сточных вод минимален или равен нулю. В этом случае, согласно тарифу (3 руб. за 1 кВт/ч), возможная экономия на электрообогреве объекта может составить 16 тыс. руб. в месяц.

Выводы

Таким образом, проблему энергосбережения сетей и сооружений водотведения в северных районах строительства возможно решить еще на этапе проектирования обоснованным выбором материала труб, вида и толщины теплоизоляции.

По результатам проведенных расчетов и анализов для Ямало-Ненецкого автономного округа предлагаются следующие рекомендации при проектировании сетей и сооружений канализации:

– начальные участки труб (от выпуска до КНС) возможно прокладывать в деятельном слое, который может составлять 0,7–2 м, без применения искусственного подогрева сети в зимнее время на достаточно большие расстояния, и это позволит сэкономить расходы на энергозатраты в холодный период года;

– с точки зрения теплопотерь материал труб (сталь или полиэтилен) не играет значительной роли из-за достаточно низких температур окружающей среды, но стоит отметить, что современный морозостойкий полиэтилен обладает несколькими лучшими показателями и при определении тепловых потерь, к тому же обладает высокой антикоррозийной стойкостью, долговечностью, что является плюсом для эксплуатации канализационных сетей;

– в качестве изоляционного материала рекомендуется использовать пенополиуретановую изоляцию (ППУ), которая в теории показала себя самым энергоэффективным и экономически целесообразным материалом для тепловой изоляции напорных и самотечных труб канализации.

В дальнейшем планируется проверка теоретических результатов на практике с использованием современных методов и приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукин Ю.Ф. Статус, состав, население Российской Арктики // *АиС*. 2014. № 15. С. 57–94.
2. Гинзбург А.В., Терехов Л.Д., Акимов О.В., Ганус А.Н. Энергосберегающие технологии при проектировании водоводов на Севере // *Проектирование и строительство транспортных объектов в условиях Республики Саха (Якутия) : сб. материалов науч.-практ. конф. Якутск : Як. фил. Изд. СО РАН, 2003. С. 86–95.*
3. Гинзбург А.В. Экономические условия эксплуатации водонесущих систем на Севере // *Коммунальный комплекс России*. 2005. № 1 (7). С. 66–69.
4. Кунахович А.А. Установка глубокой очистки бытовых сточных вод для применения в поселках северной климатической зоны // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2012. № 5. С. 61–65.
5. Андрияшев М.М. Гидравлические и тепловые расчеты водопроводных линий и сетей // Москва: Изд-во МКХ РСФСР, 1956. 172 с.
6. Ястребов А.П. Инженерные коммуникации на вечномёрзлых грунтах // Ленинград: Стройиздат, 1972. 175 с.
7. Vialkova E., Maksimova S., Zemlyanova M., Maksimov L., Vorotnikova A. Integrated Design Approach to Small Sewage Systems in the Arctic Climate // *Environmental Processes*. 2020. № 7 (2). P. 673–690.
8. Латуева О.Г. Особенности проектирования систем водоснабжения и канализации при обустройстве нефтяных месторождений // *Молодежь и наука : сб. материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края*. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/19178>
9. Дементьева М.Е., Курохтин А.А. Особенности эксплуатации канализационно-насосных станций теплоэлектростанций в условиях Крайнего Севера // *Вестник МГСУ*. 2019. № 14. Вып. 3. С. 356–366.
10. Хренков Н.Н. Сопоставление температурных режимов обогрева стальных и пластиковых трубопроводов // *Промышленный электрообогрев и электроотопление*. 2014. № 1. С. 28–36.
11. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003 : дата введения 2013-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200091050>
12. Карнаухов Н.Н. Механика мерзлых грунтов и принципы строительства нефтегазовых объектов в условиях Севера. Москва : ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 432 с.

13. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированное издание СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» : дата введения 2021-06-25. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358/>
14. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на Крайнем Севере. Ленинград : Госстройиздат, 1963. 492 с.

REFERENCES

1. Lukin Yu.F. Status, sostav, naselenie Rossiiskoi Arktiki [Status, composition, and population of the Russian Arctic]. *AiS*. 2014. No. 15. Pp. 57–94. (rus)
2. Ginzburg A.V., Terekhov L.D., Akimov O.V., Ganus A.N. Energoberegayushchie tekhnologii pri proektirovanii vodovodov na Severe [Energy-saving technologies in water pipeline design in the North]. In: Proektirovanie i stroitel'stvo transportnykh ob"ektov v usloviyakh Respubliki Sakha (Yakutiya): sb. materialov nauch.-prakt. konf. Yakutsk (*Proc. Sci. Conf. 'Design and Construction of Transport Facilities in the Republic of Sakha (Yakutia)'*), 2003. Pp. 86–95. (rus)
3. Ginzburg A.V. Ekonomicheskie usloviya ekspluatatsii vodonesushchikh sistem na Severe [Economic conditions of water-carrying system operation in the North]. *Kommunal'nyi kompleks Rossii*. 2005. No. 1 (7). Pp. 66–69. (rus)
4. Kunakhovich A.A. Ustanovka glubokoi ochistki bytovykh stochnykh vod dlya primeneniya v poselkakh severnoi klimaticheskoi [Deep treatment of domestic wastewater for settlements in northern climate]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2012. No. 5. Pp. 61–65. (rus)
5. Andriyashov M.M. Gidravlicheskie i teplovye raschety vodoprovodnykh linii i setei [Hydraulic and thermal calculations of water lines and networks]. Moscow, 1949. 254 p. (rus)
6. Yastrebov A.P. Inzhenernye kommunikatsii na vechnomerzlykh gruntakh [Engineering communications on permafrost soils]. Leningrad: Stroiizdat, 1972. 175 p. (rus)
7. Vialkova E., Maksimova S., Zemlyanova M., Maksimov L., Vorotnikova A. Integrated design approach to small sewage systems in the arctic climate. *Environmental Processes*. 2020. No. 7 (2). Pp. 673–690.
8. Latueva O.G. Osobennosti proektirovaniya sistem vodosnabzheniya i kanalizatsii pri obustroistve neftyanykh mestorozhdenii [Water supply and sewage system design in oil field development]. In: Molodezh' i nauka: sb. materialov 10 Yubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 80-letiyu obrazovaniya Krasnoyarskogo kraia (*Proc. 10th All-Russ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Science and Youth'*). Krasnoyarsk, 2014. Available: <https://elibrary.sfu-kras.ru/handle/2311/19178> (rus)
9. Dement'eva M.E., Kurokhtin A.A. Osobennosti ekspluatatsii kanalizatsionno-nasosnykh stantsii teploelektrostantsii v usloviyakh Krainego Severa [Sewage pumping station operation of thermal power plants in the Far North]. *Vestnik MGSU*. 2019. No. 14. Pp. 356–366. (rus)
10. Khrenkov N.N. Sopostavlenie temperaturnykh rezhimov obogreva stal'nykh i plastikovykh [Comparison of heating modes of steel and plastic pipelines]. *Promyshlennyye elektroobogrev i elektrootoplenie*. 2014. No. 1. Pp. 28–36. (rus)
11. СП 61.13330.2012. Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov [Thermal insulation of equipment and pipelines.]. Available: <https://docs.cntd.ru/document/1200091050> (rus)
12. Karnaukhov N.N. Mekhanika merzlykh gruntov i printsipy stroitel'stva neftegazovykh ob"ektov v usloviyakh Severa [Frozen soil mechanics and principles of oil and gas facility construction in the North]. Moscow, 2008. 432 p. (rus)
13. СП 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya [Construction climatology]. Available: <https://docs.cntd.ru/document/573659358/> (rus)
14. Velli Yu.Ya., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. Zdaniya i sooruzheniya na krainem severe [Buildings in the far north]. Leningrad: Gosstroizdat, 1963. 492 p. (rus)

Сведения об авторах

Суглобов Даниил Алексеевич, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, suglobovda@gmail.com

Вялкова Елена Игоревна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, vyalkova-e@yandex.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kyky60@bk.ru

Authors Details

Daniil A. Suglovov, Graduate Student, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, suglovovda@gmail.com

Elena I. Vyalkova, PhD, A/Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, vyalkova-e@yandex.ru

Elena Yu. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kyky60@bk.ru

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.131

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-145-150

*С.Г. КОЛМОГОРОВ, П.Л. КЛЕМЯЦИОНОК, С.С. КОЛМОГОРОВА,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I*

К ВОПРОСУ УПЛОТНЕНИЯ ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Аннотация. В глинистых грунтах могут происходить различного рода сложные, в том числе и физико-химические, процессы, в конечном итоге определяющие их прочностные и деформативные свойства. Для использования глинистых грунтов в качестве основания возникает необходимость повышения их прочности, что достигается в первую очередь за счёт процесса уплотнения. В уплотнении глинистых грунтов основную роль играет физически связанная вода, которая группируется вокруг частиц в виде водных оболочек и затрудняет процесс уплотнения.

В настоящей работе рассматривается процесс уплотнения переувлажнённых глинистых грунтов совместно с вибрацией, которая позволяет обеспечить интенсивный переход связанной воды в свободное состояние. Оболочки физически связанной воды при этом будут становиться меньше, что увеличит возможность сближения частиц под давлением. Это способствует увеличению контактов между частицами и в результате развитию процесса уплотнения грунта.

Ключевые слова: глинистый грунт, уплотнение, вибрация, связанная вода

Для цитирования: Колмогоров С.Г., Клемяционик П.Л., Колмогорова С.С. К вопросу уплотнения переувлажнённых глинистых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 145–150.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-145-150

*S.G. KOLMOGOROV, P.L. KLEMYATSIONOK, S.S. KOLMOGOROVA,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*

TOWARD COMPACTION OF OVERMOISTURED CLAY SOIL

Abstract. Various complicated processes, including physical and chemical, occur in clay soils, which finally determine their strength and stress-and-strain properties. In order to use clay soils as a subgrade, it is necessary to increase their strength primarily through a compaction. In clay soil compaction, the main role belongs to physically bound water, which gathers around soil particles forming water envelopes and making the compaction difficult.

The paper considers compaction of overmoistured clay soils along with vibration, that provides an intensive transition of bound water to a free state. In this case, the envelopes of physically bound water become smaller, thereby increasing the possibility of the particle bonding under pressure. This improves the contact between the soil particles and the soil compaction.

Keywords: clay soil, compaction, vibration, bound water

For citation: Kolmogorov S.G., Klemyatsionok P.L., Kolmogorova S.S. K voprosu uplotneniya pereuvlazhnennykh glinistyykh gruntov [Toward compaction of overmoistured clay soil]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 145–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-145-150

Как известно, повышение прочности глинистых грунтов связано в первую очередь с их уплотнением. В настоящее время установлено, что при сжатии глинистого грунта его гранулометрический состав и степень дисперсности остаются практически неизменными. Это происходит потому, что минеральные частицы грунта являются достаточно прочными и могут рассматриваться как несжимаемые. В результате уплотнение грунта происходит преимущественно за счет сближения частиц, за счет повышения их концентрации в единице объема, иначе говоря, за счет уменьшения пористости. При этом происходит перегруппировка частиц (или их агрегатов) и взаимное перемещение относительно друг друга.

Принято считать, что уплотнение грунтов определяется только возможностью фильтрации воды в уплотняемой толще. Согласно классической механике грунтов (теория фильтрационной консолидации), продолжительность осадки под нагрузкой ставится в зависимость от величины коэффициента фильтрации. Эта теория справедлива для песчаных грунтов, которые в основном содержат свободную воду. В глинистых грунтах основную роль играет физически связанная вода, которая группируется вокруг частиц в виде водных оболочек, более плотных в центральных частях и рыхлых в периферийных.

Водные оболочки, прежде всего, увеличивают диаметр частиц и тем самым уменьшают возможность взаимного перемещения этих частиц, поскольку их величина становится большей, нежели диаметр пор. Наличие водных оболочек, таким образом, ограничивает проявление структурных деформаций (по Н.Я. Денисову), являющихся основным фактором при уплотнении грунта. При возрастающем давлении на грунт сближение частиц может происходить лишь за счет деформации водных оболочек, т. е. за счет структурно-адсорбционных деформаций.

В процессе структурно-адсорбционных деформаций происходит частичное отжатие воды, в первую очередь из периферийных слоев водных оболочек. Эта отжатая часть воды становится свободной и при соответствующих условиях может быть удалена из грунта. Однако в грунтовом массиве подобные условия отсутствуют, т. к. фильтрация к краевым участкам массива затруднена.

Как показали опыты [1], полное удаление физически связанной воды не достигается даже при очень больших нагрузках. В табл. 1 приведено изменение влажности кембрийской глины под различными нагрузками с указанием количества отжатой воды (В.Д. Ломтадзе).

Таблица 1

Изменение влажности кембрийской глины под нагрузкой

Нагрузка, МПа	0	6	15	50	100	300	500
Влажность, %	40,1	13,8	10,8	8,2	6,4	4,6	3,2
Количество отжатой воды, г	–	18,8	2,2	1,8	1,3	0,6	0,4

Из данных таблицы видно, что наибольшее отжатие воды происходит в начальной стадии уплотнения. В дальнейшем процесс уменьшения влажности весьма замедляется. Это связано с тем, что по мере уплотнения и удаления воды начинает отжиматься наиболее прочно связанная вода. Если учесть, что максимальная гигроскопическая влажность для кембрийских глин составляет 4,9 %, то можно видеть, что при нагрузке в 300 МПа начинает отжиматься гигроскопически связанная вода.

Как известно, наиболее эффективное уплотнения грунтов, в том числе глинистых, достигается при оптимальной влажности, причем эта влажность зависит от уплотняющей нагрузки. При увеличении уплотняющей нагрузки оптимальная влажность понижается.

Установлено также, что уплотняемость (сжатие) глинистых грунтов будет различной в зависимости от того, как прилагается нагрузка на грунт – резко (мгновенно) или постепенно [1]. Большее сжатие (уплотнение) будет иметь место в первом случае. Постепенное увеличение нагрузки (ступенями) при прочих равных условиях вызывает меньшее уплотнение глинистого грунта. Данное явление связано с тем, что при постепенно возрастающей нагрузке в глинистом грунте создается сцепление упрочнения (по Н.Я. Денисову), которое затрудняет дальнейшее сжатие грунта. При быстром повышении нагрузки происходит резкая деформация грунта и его сжатие, причем за этот короткий период сцепление упрочнения не возникает.

Таким образом, на уплотняемость глинистых грунтов будут влиять количество физически связанной воды и темпы возрастания нагрузки. Но основным фактором следует считать количество физически связанной воды.

Известно, что уплотнение глинистых грунтов при влажности выше некоторого значения практически невозможно [2]. Основной причиной невозможности уплотнения глинистых грунтов, находящихся в переувлажненном состоянии, является физически связанная вода. По данным В.Д. Ломтадзе [3], при уплотнении переувлажненных глин, без возможности бокового расширения (компрессия), наблюдаются три стадии (табл. 1). Первая стадия – при давлении от 0 до 6 МПа – соответствует наибольшему отжатию воды, предположительно удаляется свободная вода. Вторая стадия наблюдается при давлении до 50 МПа, как считает автор, на этом этапе часть физически связанной воды переходит в свободную. Третья стадия соответствуют давлению выше 50 МПа, когда отжимается вода, соответствующая влажности, близкой к гигроскопической (физически связанная).

В условиях относительно свободного бокового расширения (в основании фундаментов) повышенное давление на переувлажненный глинистый

грунт вызовет выдавливание грунта из-под уплотняющей нагрузки. Последнее обусловлено тем, что переувлажненный глинистый грунт обладает небольшим сопротивлением сдвигу. В этом случае деформации под действием нагрузки в условиях свободного бокового расширения будут происходить без изменения объема.

Поскольку основной причиной невозможности уплотнения переувлажненных глинистых грунтов является физически связанная вода, необходимо одновременно с действием нагрузки обеспечивать интенсивный переход этой воды в свободное состояние. Таким мероприятием может быть, например, вибрация.

Использование вибрации для уплотнения песчаных грунтов, как известно, имеет широкое применение. Воздействие вибрации на глинистые грунты является сложным и принципиально отличным, нежели в песках.

Изменение состояния глинистого грунта, содержащего то или иное количество воды, под действием вибрации связывается с тиксотропными превращениями, происходящими в глинистом грунте. В явлении тиксотропии различают две стадии: разжижение и восстановление структуры. Разжижение грунта рассматривается как процесс перехода грунта из состояния геля в состояние золя; обратимый переход вызывает восстановление структуры.

Предполагается, что разжижение глинистого грунта при вибрации связано с тем, что в результате колебаний высокой частоты какая-то часть физически связанной воды переходит в свободную. Последняя как бы разобцает частицы грунта (покрывает водной пленкой) и сообщает им подвижность, что и проявляется как разжижение. При прекращении вибрации вода вновь переходит в физически связанную и происходит восстановление структуры. Процесс тиксотропии зависит от степени дисперсности грунта, формы частиц, влажности, пористости, минералогического состава и т. д. Так, в грунтах, лишенных глинистых частиц, тиксотропия не проявляется.

Зависимость тиксотропии от влажности выражается в том, что более влажные грунты легче подвергаются тиксотропным превращениям. Вообще, только при наличии физически связанной воды грунт становится способным к тиксотропии, причем чем больше содержит грунт этой воды, тем легче грунт может перейти в разжиженное состояние.

При прекращении вибрации, как уже отмечалось выше, происходит обратный переход освободившейся воды в физически связанную. При этом может быть получена более прочная структура грунта. Это связано с тем, что вибрация, по-видимому, может обусловить более плотную упаковку частиц, увеличить количество контактов между ними и, следовательно, повысить прочность грунта. В то же время многократная длительная вибрация приводит к разуплотнению глинистого грунта, т. е. прочность его становится меньше ранее существующей.

По всей видимости, вибрация сама по себе едва ли может вызвать более или менее значительное уплотнение и упрочнение грунта. Явление вибрации может быть эффективно использовано для уплотнения переувлажненного глинистого грунта, если последний одновременно с вибрацией подвергнуть нагрузке. Освобождающаяся при этом вода под воздействием градиента, создаваемого нагрузкой, должна легко удаляться из грунта. Оболочки физически связанной воды при этом будут становиться меньше, что повысит возможность

сближения частиц под давлением, увеличение контактов между ними и связанное с этим уплотнение грунта.

Были выполнены опыты по уплотнению глинистого грунта механической нагрузкой с одновременной вибрацией. Опыты проводились на компрессионное сжатие в приборе КПр-1М в одометре площадью 60 см². Высота образца составляла 2,5 см, объем образца – 150 см³. Давление на образец передавалось через рычажный пресс ступенями.

Вибрация создавалась ударом ручным молотком по столу компрессионного прибора с определенной частотой (60 ударов в минуту). Опыты проводились на пастах кембрийской глины (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики кембрийской глины

Зерновой состав, %, размер частиц, мм						ρ_s , г/см ³	W_p	W_L	I_p
0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	0,002–0,001	Менее 0,001	2,66	18	41	28
1,0	7,0	30,8	30,4	9,8	21,0				
Всего: 8,0		61,2		30,8					

Приготовленная паста имела влажность в пределах 37–39 % (более чем полусумма пределов пластичности и предела текучести).

Испытания проводились следующим образом: загруженный в одометр образец подвергался давлению 0,1 МПа до полной консолидации (до прекращения сжатия грунта при данной нагрузке). Сжатие образца фиксировалось индикаторами. Затем грунт без снятия нагрузки подвергался вибрации. Последняя продолжалась в течение 1 мин. После вибрации фиксировались показания индикаторов и велись наблюдения за дальнейшим сжатием образца снова до полной консолидации. После этого вибрация повторялась, фиксировались показания индикаторов и т. д.

Результаты опытов показали, что вначале сжатие грунта под нагрузкой происходит довольно интенсивно, но уже через 3,5 ч наблюдалось затухание этого процесса, что свидетельствует о завершении консолидации. Вибрация в течение 1 мин резко увеличивает сжатие образца. Грунт сжимается почти мгновенно. После прекращения вибрации сжатие грунта некоторое время продолжается, но более медленными темпами и снова прекращается. Наступает новое предельное равновесие. Повторные вибрации вызывают дальнейшее сжатие образца.

Естественно, опыты сопровождалось уменьшением влажности грунта, подвергнувшегося давлению и вибрации. Так, если до опытов влажность исследуемой глинистой пасты составляла 37–39 %, то после опытов она уменьшилась до 25–27 % и ниже. Соответственно с этим коэффициент пористости изменился от 1,2 (до сжатия) до 0,68–0,76.

Таким образом, используя явление вибрации, можно добиться значительного уплотнения весьма небольшой нагрузкой переувлажненного глинистого грунта. Правда, это уплотнение достигалось в условиях невозможности

бокового расширения грунта, что не моделирует условия уплотнения в естественных условиях. Однако подбором соответствующих уплотняющих (постепенно возрастающих) нагрузок можно добиться уплотнения и в условиях свободного бокового расширения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Денисов Н.Я.* Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. Москва : Госэнергоиздат, 1956. 288 с.
2. *Саатчан Г.Г.* Методы уплотнения насыпей / Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства. Москва : Трансжелдориздат, 1957.
3. *Ломтадзе В.Д.* Изменение влажности глин при уплотнении их большими нагрузками // Записки Ленинградского горного института. 1953. Т. 29. Вып. 2.

REFERENCES

1. *Denisov N.Ya.* Stroitel'nye svoistva glinistykh porod i ikh ispol'zovanie v gidrotekhnicheskom stroitel'stve [Construction properties of clay soils and their use in hydraulic engineering construction]. Moscow: Gosenergoizdat, 1956. (rus)
2. *Saatchan G.G.* Metody uplotneniya nasypei [Methods of embankment compaction]. Moscow: Transzheldorizdat, 1957. (rus)
3. *Lomtadze V.D.* Izmenenie vlazhnosti glin pri uplotnenii ikh bol'shimi nagruzkami [Clay moisture content changed after heavy load]. *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta*. 1953, V. 29. No. 2. (rus)

Сведения об авторах

Колмогоров Сергей Гаврилович, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovsg@list.ru

Клемяционок Петр Леонидович, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Petr.1940@list.ru

Колмогорова Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovass@yandex.ru

Authors Details

Sergey G. Kolmogorov, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Kolmogorovsg@list.ru

Petr L. Klemyatsionok, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Petr.1940@list.ru

Svetlana S. Kolmogorova, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Kolmogorovsg@list.ru

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

УДК 665.455:006.354

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-151-168

О.В. МАТВИЕНКО^{1,2}, А.Е. ЛИТВИНОВА², Н.С. ФИРСАНОВА²,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО, ОПИСЫВАЕМОГО МОДЕЛЬЮ КРОССА, В ТРУБЕ С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ*

Аннотация. Проведено исследование течения полимерно-битумного вяжущего в трубе с внезапным расширением. При малых значениях параметра расширения в приосевой области формируется зона высоковязкого течения, в периферийной и пристеночной зонах происходит уменьшение эффективной вязкости. Процессы разрушения структурных связей, интенсивно протекающие в окрестности границы втекающей из подводящего патрубка струи, приводят к уменьшению эффективной вязкости. Формирование угловой зоны возвратных течений сопровождается ростом в ней значений эффективной вязкости.

Ключевые слова: реология, битумные вяжущие, вязкость, неньютоновские жидкости, модель Кросса

Для цитирования: Матвиенко О.В., Литвинова А.Е., Фирсанова Н.С. Исследование структуры течения полимерно-битумного вяжущего, описываемого моделью Кросса, в трубе с внезапным расширением // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 151–168.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-151-168

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90078.

O.V. MATVIENKO^{1,2}, A.E. LITVINOVA², N.S. FIRSANOVA²,

¹*Tomsk State University of Architecture and Building,*

²*National Research Tomsk State University*

THE CROSS MODEL OF LIQUID POLYMER-BITUMEN BINDER STRUCTURE IN A PIPE WITH SUDDEN EXPANSION

Abstract. The paper investigates the liquid polymer-bitumen binder in a pipe with a sudden expansion. At small values of the expansion parameter, the formation of a high-viscosity liquid zone occurs in the axial region, and the effective viscosity decreases at the periphery and near-wall zones. The destruction process of structural bonds, which intensively proceeds near the flow from the supply pipe, leads to a decrease in the effective viscosity. The formation of a corner area of reverse flows is accompanied by the increase in the effective viscosity.

Keywords: rheology, bituminous binder, viscosity, non-Newtonian fluid, Cross model

For citation: Matvienko O.V., Litvinova A.E., Firsanova N.S. Issledovanie struktury techeniya polimerno-bitumnogo vyazhushchego, opisываемого model'yu Krossa, v trube s vnezapnym rasshireniem [The Cross model of liquid polymer-bitumen binder structure in a pipe with sudden expansion]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 151–168.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-151-168

Введение

Потребность в производстве полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) связана с увеличением интенсивности движения и ростом нагрузок на дорожное покрытие, а также со специфическими условиями эксплуатации объектов дорожного строительства в различных климатических условиях [1].

Модифицирование дорожных битумов полимерами является одним из способов повышения их эксплуатационных свойств, в том числе снижения температуры хрупкости, расширения температурного интервала, повышения деформационной стабильности, долговечности и устойчивости к старению [2–5].

Многочисленные исследования показывают преимущество битумных вяжущих с добавлением стирол-бутадиен-стирольных полимеров (СБС-полимеров) над обычными нефтяными битумами [3, 6–8]. Если использовать в качестве модификатора битума СБС-полимер, эластичность дорожного покрытия многократно повышается и, как следствие, увеличивается срок службы. Добавление СБС-полимера повышает устойчивость покрытия к низким температурам, т. к. за счет гибкости модифицированного битума оно меньше подвергается «одревенению» во время зимних морозов. Покрытие с СБС-полимером отлично сопротивляется циклическим знакопеременным нагрузкам, адгезия его значительно выше, чем у обычного битума. Качественный СБС-полимер повышает теплоустойкость дорожного покрытия вплоть до 100 °С. Это свойство особенно важно в самые жаркие месяцы, когда солнце особенно активно.

Цикл теоретических исследований процессов течения и модифицирования битумных вяжущих в технологических устройствах проведен в работах [9–16].

Важнейшим элементом системы перекачки битумных вяжущих в процессе их модификации является трубопровод, который включает в себя

различные функциональные элементы: краны, затворы, клапаны, штуцеры, крестовины, переходники. Наличие перечисленных деталей часто приводит к формированию скачка сечения – участка резкого изменения площади проходного сечения в меньшую (сужение) или в большую (расширение) сторону [17].

Использование конструктивных элементов различного назначения, в том числе сужения и расширения, приводит к дополнительным потерям энергии за счет вынужденной перестройки потока при развитии соответствующей картины течения [18–20]. Для организации требуемого режима и создания условий течения с целью обеспечения эффективной транспортировки среды необходимы данные о влиянии геометрических особенностей трубопровода на формирование структуры потока, кинематические и динамические характеристики течения.

Вязкость полимерно-битумных вязущих

Вязкость битумных вязущих зависит от их коллоидной структуры, степени дисперсности, температуры, параметров течения и может сильно изменяться в технологическом процессе. Подробный обзор исследований, посвященных течениям реологически сложных сред, приведен в работах [3, 21–31].

Результаты исследований, представленные в научных статьях [1, 6, 7], показывают, что зависимость эффективной вязкости от сдвигового напряжения имеет три характерных режима течения. Эффективная вязкость в области низких скоростей деформации постоянна и представляет собой наибольшую вязкость вязущего при «нулевой» скорости сдвига μ_0 . Этот режим течения отвечает неразрушенной структуре полимерно-битумного вязущего. Это означает, что деформирование осуществляется с таким малым напряжением, что интенсивность процессов разрушения и восстановления структуры одинакова. Переходному режиму течения отвечают промежуточные скорости сдвига. Для этого режима течения характерно уменьшение эффективной вязкости вязущего с возрастанием скорости сдвига. С точки зрения реологии наличие этого режима объясняется тем, что скорость разрушения пространственной структуры превышает скорость её восстановления. Третий режим течения отвечает области предельно разрушенной структуры, когда процессы разрушения молекулярных связей в ПВБ гораздо интенсивнее, чем процессы восстановления. Вязкость, которая отвечает этому участку, называется вязкостью предельно разрушенной структуры (вязкостью при «бесконечной» скорости сдвига) μ_∞ .

При аппроксимации экспериментальных исследований течения ПВБ в качестве одной из наиболее универсальных моделей можно использовать реологическую модель Кросса [7, 32]:

$$\frac{\mu_0 - \mu_{eff}}{\mu_{eff} - \mu_\infty} = \left(\frac{U}{U_*} \right)^n, \quad (1)$$

где n – показатель нелинейности; U_* – скорость сдвига, при которой происходит резкое изменение вязкости. Параметры U_* и n принимаются постоянными для данной жидкости в некотором ограниченном диапазоне изменения скоростей сдвига. Они определяются из вискозиметрических опытов и анализа так называемых кривых течения.

Настоящая работа является продолжением исследований течения битумных вяжущих [33–37]. Целью работы является исследование структуры течения полимерно-битумного вяжущего, описываемого моделью Кросса, в цилиндрическом канале с внезапным расширением. При математическом моделировании предполагается, что ПБВ подается из подводящего патрубка радиусом r_{in} в трубы радиусом R и длиной L .

Математическая модель течения битумного вяжущего

Для описания поля течения используются двумерные осесимметричные уравнения реодинамики, описывающие баланс массы и количества движения [3, 31, 38–40]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u v r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{xr}}{\partial r}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v^2 r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{rr}}{\partial r} - \frac{\tau_{\varphi\varphi}}{r}. \quad (4)$$

Для полимерно-битумного вяжущего, описываемого моделью Кросса, реологические соотношения в случае осесимметричного течения имеют вид [32]:

$$\tau_{xx} = 2 \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{xr} = \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{rr} = \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \frac{\partial v}{\partial r},$$

$$\tau_{\varphi\varphi} = 2 \frac{\mu_0 U_*^n + \mu_\infty U^n}{U_*^n + U^n} \frac{v}{r}, \quad (5)$$

$$U = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2. \quad (6)$$

На границах расчетной области задавались следующие условия [31, 41–43]:

$$x=0, \quad r \leq r_{in}: \quad u = u_{in} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad v=0;$$

$$x=L: \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad v=0;$$

$$r=0: \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad v=0;$$

$$0 \leq x \leq L, \quad r=R: \quad u=0, \quad v=0;$$

$$x=0, \quad r_{in} < r < R: \quad u=0, \quad v=0.$$

Величина u_{in} определяет скорость на оси течения на входе в канал. Для параболического распределения осевой скорости эта величина связана с объёмным расходом жидкости Q соотношением

$$u_{in} = 2 \frac{Q}{\pi r_{in}^2}.$$

Уравнения (2) – (4) решались численно с использованием метода конечного объема [44, 45].

Результаты математического моделирования

Перейдем к анализу полученных результатов. Диапазон изменения параметров был выбран следующим: вязкость вяжущего при «нулевой» скорости сдвига $\mu_0 = 105,6$ Па·с, вязкость при «бесконечной» скорости сдвига $\mu_\infty = 14,7$ Па·с, показатель нелинейности $n = 0,312$, характерная скорость сдвиговых деформаций $U_* = 1,59$ с⁻¹. Выбранный диапазон изменения параметров соответствует свойствам полимерно-битумных вяжущих, модифицированных СБС полимером [7]. Объемный расход жидкости составлял $Q = 0,03$ м³/с, радиус канала $R = 0,1$ м, радиус подводящего патрубка варьировался в диапазоне $R = 0,02$ – $0,08$ м.

Рассмотрим сначала течение полимерно-битумного вяжущего в цилиндрической трубе постоянного сечения. При моделировании поля течения в трубе предполагалось, что распределение скоростей на входе в канал подчиняется закону Пуазейля, соответствующему установившемуся течению ньютоновской жидкости. Для неньютоновской жидкости на начальном участке течения происходит перестройка потока. В результате этой перестройки скорость потока в приосевой области увеличивается, а в пристеночной – уменьшается (рис. 1).

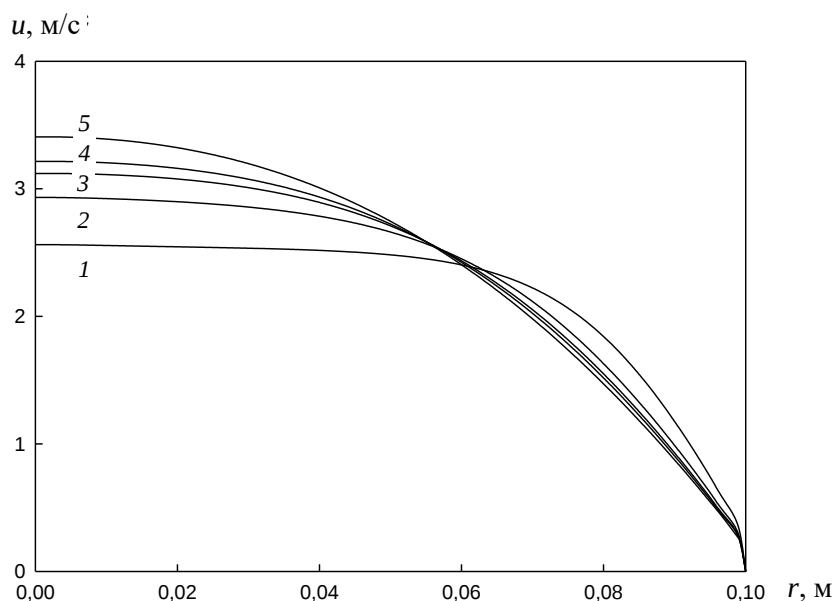


Рис. 1. Радиальное распределение осевой скорости u в трубе постоянного сечения:
1 – $x = 0,16$ м; 2 – $x = 0,36$ м; 3 – $x = 0,56$ м; 4 – $x = 0,76$ м; 5 – $x = 1,56$ м

Картину течения полимерно-битумного вяжущего показывают линии тока (рис. 2).

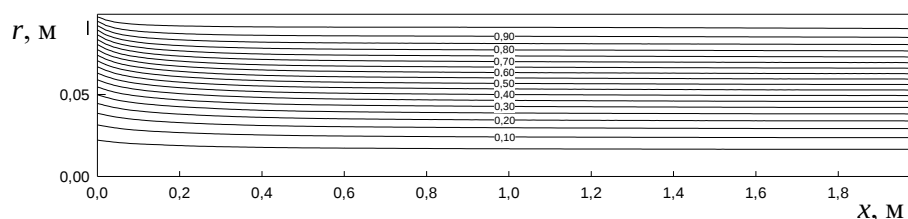


Рис. 2. Линии тока полимерно-битумного вяжущего в трубе постоянного сечения

На начальном участке течения заметно искривление линий тока, что связано с формированием гидродинамической стабилизации потока. Увеличение осевой скорости в центральной части течения происходит в результате оттока жидкости из пристеночной области в приосевую, и, как следствие этого, на начальном участке течения происходит смещение линий тока к оси канала. После гидродинамической стабилизации радиальное движение жидкости прекращается, и линии тока становятся параллельными оси.

Рассмотрим некоторые особенности радиального распределения эффективной вязкости при течении среды Кросса. Радиальные распределения эффективной вязкости μ_{eff} представлены на рис. 3. В приосевой зоне течения, где градиенты скорости имеют невысокие значения, заметно увеличение эффективной вязкости. В окрестности стенки, где градиенты скорости максимальны, происходит уменьшение эффективной вязкости. Значения эффективной вязкости в приосевой зоне увеличиваются вниз по потоку, при этом, по мере гидродинамической стабилизации, в приосевой области формируется зона высоковязкого течения, характерная для сред, обладающих псевдопластическими свойствами.

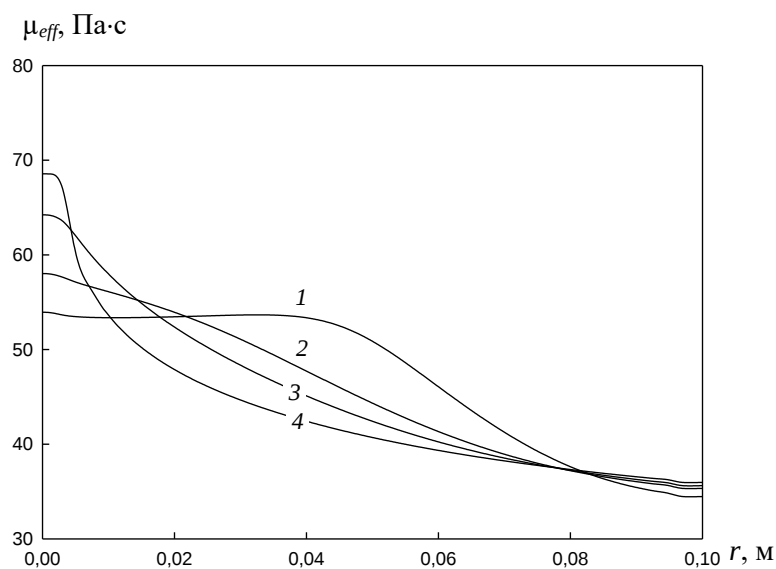


Рис. 3. Радиальное распределение эффективной вязкости μ_{eff} в трубе постоянного сечения:
1 – $x = 0,16$ м; 2 – $x = 0,36$ м; 3 – $x = 0,56$ м; 4 – $x = 1,56$ м

Распределение эффективной вязкости в потоке характеризуют изолинии вязкости, представленные на рис. 4.

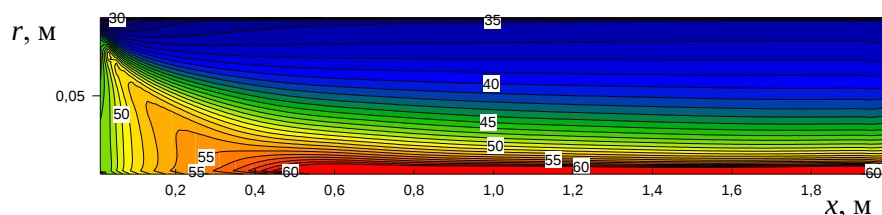


Рис. 4. Изолинии эффективной вязкости полимерно-битумного вязущего в трубе постоянного сечения $\eta = 0$

На начальном участке течения происходит увеличение эффективной вязкости в приосевой зоне. При этом область высоковязкого течения смещается к оси трубы. После гидродинамической стабилизации течения изолинии эффективной вязкости становятся параллельными оси течения. При этом максимальные значения вязкости наблюдаются вблизи оси течения, минимальные – около стенки.

Перейдем к анализу влияния скачка сечения на структуру течения полимерно-битумного вязущего. С этой целью было проведено исследование влияния степени расширения канала $\eta = (R - r_{in})/R$ на параметры течения.

На рис. 5 показаны радиальные распределения осевой скорости в канале со скачком расширения.

При значениях параметра $\eta < 0,25$ влияние скачка сечения на структуру течения незначительно. Об этом свидетельствует близость кривых на рис. 1 и 5, а. В этом случае наблюдается незначительное расширение струи, втекающей в трубу из подводящего патрубку, и формирование застойной зоны в окрестности торцевой стенки.

С ростом значений η картина течения существенно изменяется. Поступающая в трубу из подводящего патрубку струя полимерно-битумного вязущего испытывает расширение, связанное с резким увеличением площади поперечного сечения. В результате этого радиус струи вниз по потоку увеличивается. На начальном участке течения в окрестности оси заметно выделяется потенциальное ядро. В периферийной области течения значения осевой скорости становятся отрицательными. Это свидетельствует о формировании угловой рециркуляционной зоны, связанной с резким расширением сечения. Абсолютные значения осевой скорости в рециркуляционной зоне вниз по потоку уменьшаются, и на значительном удалении от входа профиль осевой скорости становится монотонным.

Линии тока для различных значений параметра η приведены на рис. 6. Отчетливо видно наличие зоны возвратных течений в области, примыкающей к входному сечению в пространстве, ограниченном внешней границей струи торцевой и цилиндрической стенками. Как видно из рис. 6, с увеличением степени расширения канала (ростом η) происходит усиление рециркуляции в угловой зоне возвратных течений, а также увеличение размеров этой зоны.

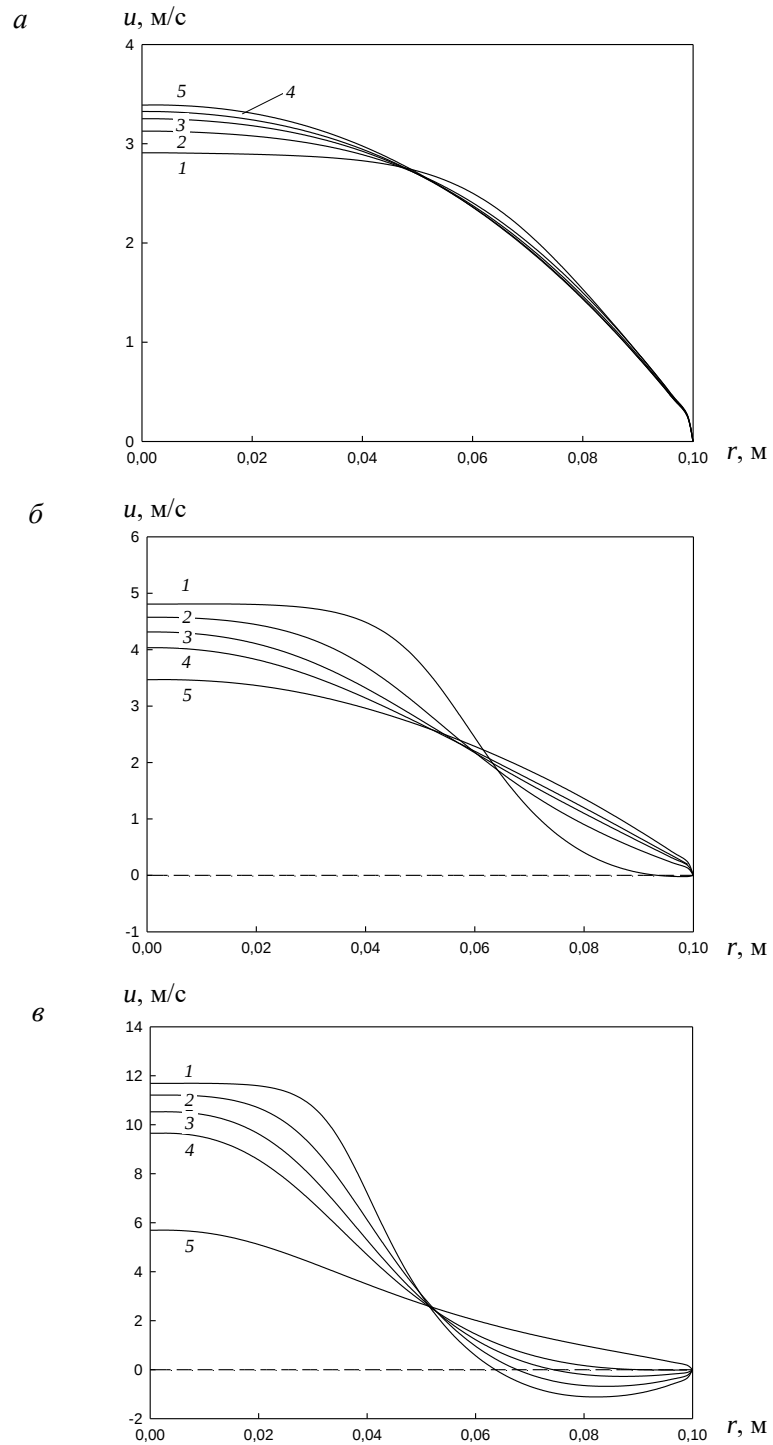


Рис. 5. Радиальное распределение осевой скорости u в трубе переменного сечения:
a – $\eta = 0,2$; *б* – $\eta = 0,4$; *в* – $\eta = 0,6$; 1 – $x = 0,16$ м; 2 – $x = 0,36$ м; 3 – $x = 0,56$ м; 4 –
 $x = 0,76$ м; 5 – $x = 1,56$ м

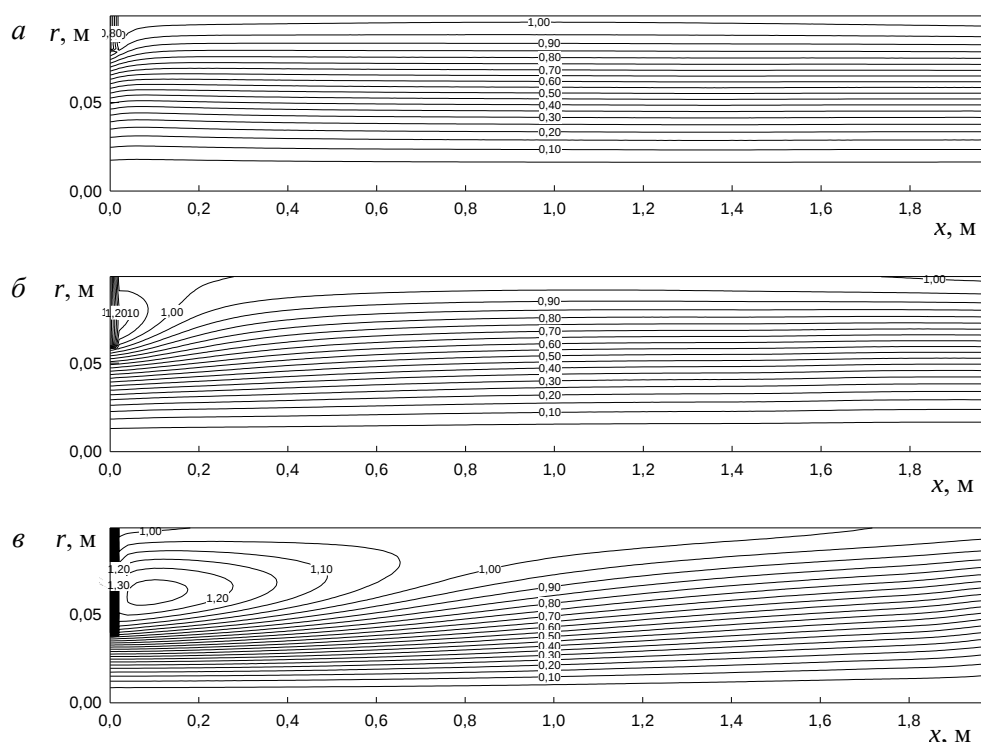


Рис. 6. Линии тока в трубе переменного сечения:

$a - \eta = 0,2$; $б - \eta = 0,4$; $в - \eta = 0,6$

Характерной особенностью полимерно-битумных вяжущих является существование структуры. В неподвижном состоянии модификатор образует непрерывную структуру, обладающую определенной прочностью. Эта структура сохраняется при малой величине приложенного напряжения. При втекании струи вяжущего из подводящего патрубка в цилиндрическую трубу на границе втекающей струи и угловой рециркуляционной (или застойной при малых η) зоны распределение скорости характеризуется значительными градиентами, а следовательно, и большими сдвиговыми напряжениями. Таким образом, с увеличением степени расширения канала η интенсифицируются процессы разрушения структуры среды.

На рис. 7 показано распределение эффективной вязкости потока в трубе со скачком сечения. В результате разрушения структурных связей при больших значениях η происходит уменьшение значений эффективной вязкости в потоке. Ширина приосевой зоны высоковязкого течения, а также максимальное значение вязкости в этой зоне уменьшаются с ростом η . При этом основная часть течения, за исключением узкой приосевой и рециркуляционной зон, характеризуется невысокими значениями вязкости. В центре рециркуляционной зоны, в области незначительных скоростей сдвиговых деформаций, величина эффективной вязкости принимает высокие значения. Таким образом, формирование зоны возвратных течений сопровождается ростом эффективной вязкости в этой зоне.

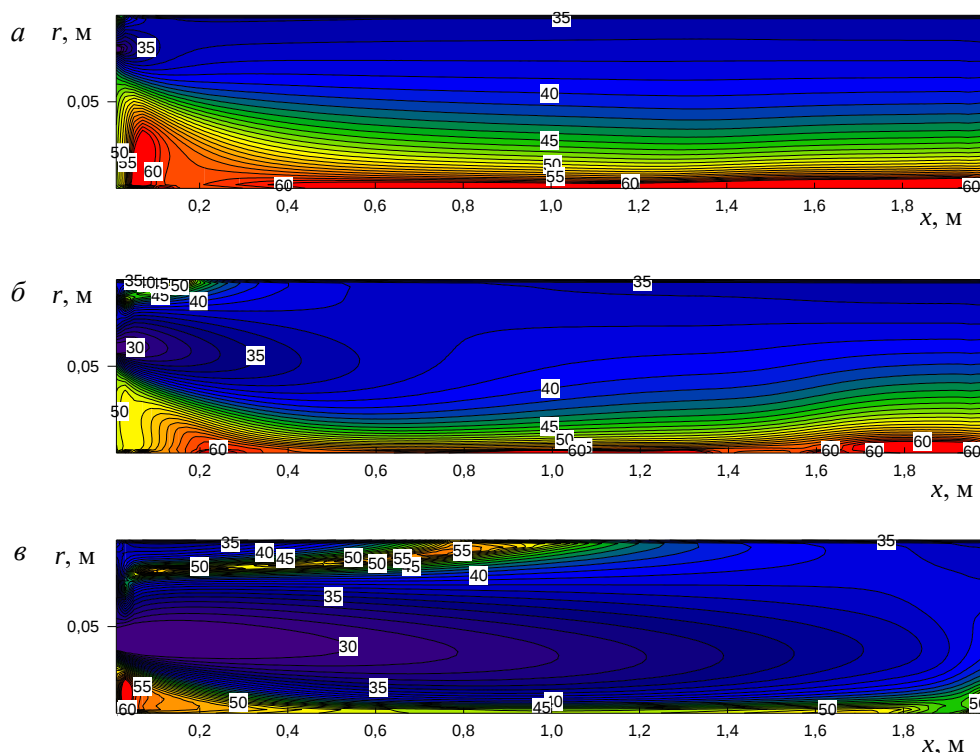


Рис. 7. Изолинии эффективной вязкости в трубе переменного сечения:
 $a - \eta = 0,2$; $b - \eta = 0,4$; $v - \eta = 0,6$

Радиальные распределения эффективной вязкости в трубе переменного сечения представлены на рис. 8.

При малых значениях параметра расширения ($\eta < 0,25$) радиальное распределение эффективной вязкости аналогично течению в трубе постоянного сечения (рис. 8, a). В приосевой области формируется зона высоковязкого течения, при этом изменение вязкости в этой зоне является несущественным. В периферийной и пристеночной зонах в результате увеличения сдвиговых напряжений происходит ослабление структурных связей и уменьшение эффективной вязкости.

При $\eta > 0,25$ структура течения характеризуется наличием угловой зоны возвратных течений. В этом случае радиальное распределение эффективной вязкости принимает более сложный вид (рис. 8, b , v). В приосевой области незначительных сдвиговых напряжений радиальное распределение эффективной вязкости характеризуется наличием плато с высокими значениями μ_{eff} . В окрестности границы втекающей из подводящего патрубка струи сдвиговые напряжения максимальны, и, как следствие этого, в этой области наиболее интенсивно происходят процессы разрушения структурных связей, приводящие к уменьшению эффективной вязкости. По мере приближения к зоне возвратных течений сдвиговые напряжения уменьшаются, и, соответственно, наблюдается рост μ_{eff} .

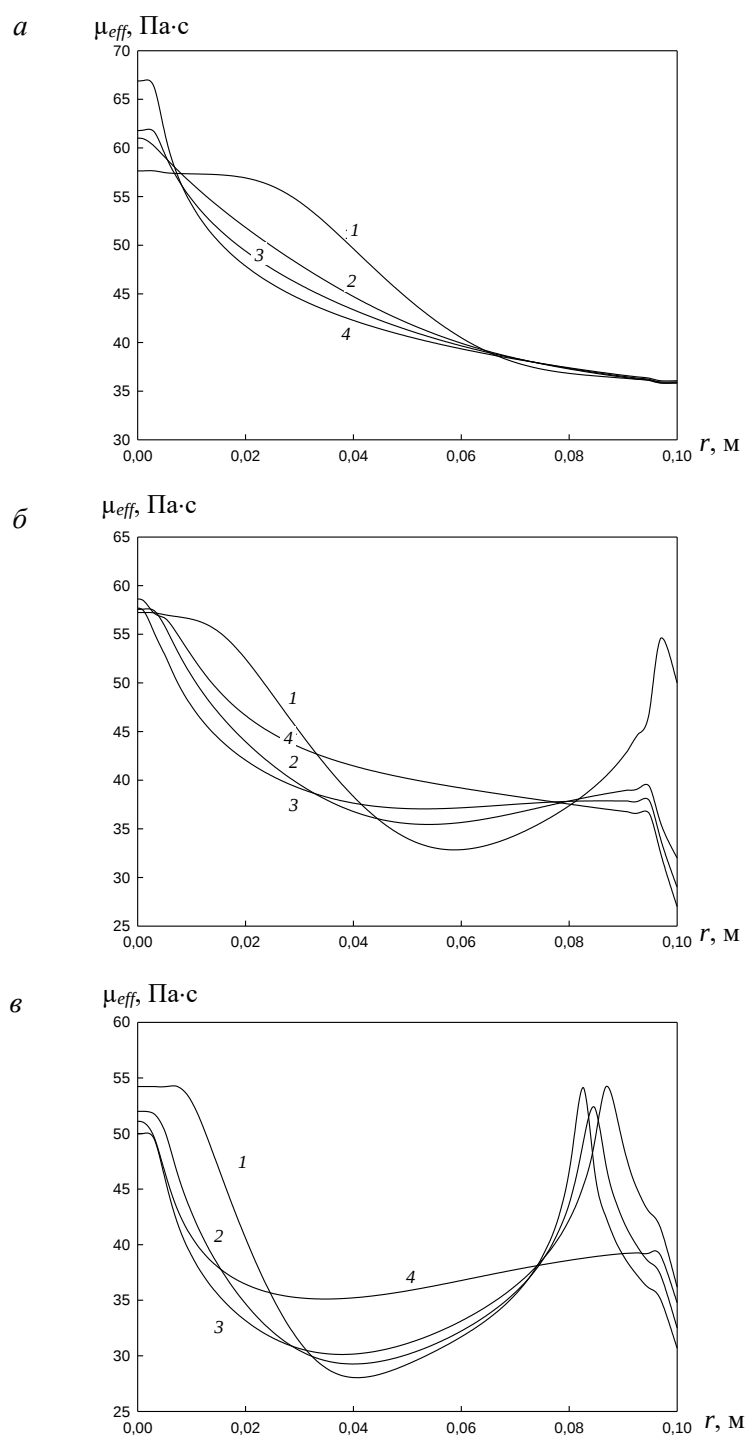


Рис. 8. Радиальное распределение осевой скорости μ_{eff} в трубе переменного сечения:

$a - \eta = 0,2$; $б - \eta = 0,4$; $в - \eta = 0,6$; 1 – $x = 0,16$ м; 2 – $x = 0,36$ м; 3 – $x = 0,56$ м; 4 – $x = 1,56$ м

В непосредственной близости от стенки сдвиговые напряжения вновь увеличиваются, а эффективная вязкость уменьшается. Увеличение μ_{eff} в рециркуляционной зоне определяется интенсивностью рециркуляции в ней, которая, в свою очередь, зависит от степени расширения канала η . Таким образом, с ростом η происходит увеличение значений μ_{eff} в рециркуляционной зоне.

Отметим, что влияние расширения канала η на структуру течения сказывается на гидродинамически нестабилизированном участке течения. Длина этого участка для рассматриваемых расходных характеристиках примерно равна $L_* = 20R$. На больших длинах ($L_* < x$) течение гидродинамически стабилизируется, при этом особенности ввода потока в трубу не влияют на структуру течения.

Заключение

В ходе выполнения работы исследована структура течения полимерно-битумного вяжущего в трубе с внезапным расширением и получены следующие результаты:

- при малых значениях параметра расширения ($\eta < 0,25$) в приосевой области формируется зона высоковязкого течения, в периферийной и пристеночной зонах в результате увеличения сдвиговых напряжений происходит уменьшение эффективной вязкости;
- в окрестности границы втекающей из подводящего патрубка струи интенсивно происходят процессы разрушения структурных связей, приводящие к уменьшению эффективной вязкости;
- в рециркуляционной зоне, в области незначительных скоростей сдвиговых деформаций, происходит рост значений эффективной вязкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Базаров Р.Б., Арутюнян Э.Р. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (63). С. 158–170.
2. Бабак О.Г., Старков Г.Б. Применение модифицированных вяжущих в дорожном строительстве // Дорожная техника и технологии. 2001. № 5. С. 72–75.
3. Галдина В.Д. Модифицированные битумы. Омск : СибАДИ, 2009. 228 с.
4. Матвиенко О.В., Унгер Ф.Г., Базуев В.П. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015.
5. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility // Adv. Colloid Interface Sci. 2015. V. 224. P. 72–112.
6. Русаков М.Н., Исмаилов А.М. Стирол-бутадиен-стирольные полимеры для автодорожного строительства в Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. № 87. DOI: 10.18720/CUBS.87.3
7. Sybilski D. Non-newtonian viscosity of polymer-modified bitumens // Materials and Structures 1993. V. 26. P. 15–23. DOI: 10.1007/BF02472233
8. Gabriela C.C., Glicerio T., Joao V.S.M., Matheus F.M., Liseane P.T., Lidia C.L. Evaluation of rheological behavior, resistance to permanent deformation and resistance to fatigue of asphalt

- mixtures modified with nanoclay and SBS polymer // Applied sciences. 2019. № 9. P. 1–16. DOI: 10.3390/app9132697
9. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К. Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вязущих // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 132–143.
 10. Матвиенко О.В., Агафонцева М.В., Базуев В.П. Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4. С. 144–156.
 11. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г. Экспериментальное исследование процесса кавитации в технологических устройствах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 165–176.
 12. Матвиенко О.В., Эфа А.К., Базуев В.П., Евтюшкин Е.В. Численное моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке // Известия вузов. Физика. 2006. Т. 49. № 6. С. 96–107.
 13. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Туркасова Н.Г., Байгулова А.И. Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3. С. 202–213.
 14. Базуев В.П., Матвиенко О.В., Вороненко В.Л. Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 4. С. 121–128.
 15. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Смирнова Н.Г., Пушкарева Г.В., Дульзон Н.К. Исследование смешения коаксиальных закрученных потоков для приготовления битумных дисперсных систем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 123–134.
 16. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Смирнова Н.Г. Численное исследование процесса образования кавитационных пузырьков в смесительном устройстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 231–245.
 17. Garcia E.J., Steffe J.F. Comparison of friction factor equations for non-Newtonian fluids in pipe flow // J. Food Process Eng. 1986. V. 9. № 2. P. 93–120.
 18. Benedict R.P., Carlucci N.A., Swetz S.D. Flow losses in abrupt enlargements and contractions // J. Eng. Power. 1966. V. 88. № 1. P. 73–81.
 19. Abdelall F.F. Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels // Exp. Therm. Fluid Sci. 2005. V. 29. № 4. P. 425–434.
 20. Рыльцев И.А., Рыльцева К.Е., Шрагер Г.Р. Кинематика течения степенной жидкости в трубе переменного сечения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 63. С. 125–138.
 21. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Сабылина Н.Р., Асеева А.Е., Суртаева А.А. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вязущего, описываемого моделью Шведова – Бингама, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 158–177.
 22. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Асеева А.Е., Веник В.Н. Течение битумного вязущего, описываемого моделью Оствальда – де Вейля, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 171–192.
 23. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Черкасов И.С., Литвинова А.Е. Исследование гидравлических характеристик потока водно-песчаной суспензии в трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 129–144.
 24. Матвиенко О.В. Исследование установившегося течения псевдопластической жидкости, описываемой моделью Сиско, в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 55. С. 99–112.
 25. Матвиенко О.В., Литвинова А.Е. Исследование установившегося течения высокопарафинистого битумного вязущего, описываемого моделью Балкли – Гершеля, в цилиндри-

- ческой трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 79–99.
26. Матвиенко О.В., Литвинова А.Е., Фирсанова Н.С. Исследование расходных характеристик установившегося течения высокопарафинистого битумного вязущего в цилиндрической трубе // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 5. С. 71–85.
27. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург : Профессия, 2007. 560 с.
28. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Москва : Мир, 1964. 216 с.
29. Кутепов А.М., Полянин Л.Д., Запрянов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика : справочное пособие. Москва : Бюро Квантум, 1996. 336 с.
30. Климов Д.М., Петров А.Г., Георгиевский Д.В. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость и перемешивание. Москва : Наука, 2005. 394 с.
31. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1987. 824 с.
32. Cross M.M. Rheology of non-Newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems // J. Colloid. Sci. 1965. V. 20. P. 417–437.
33. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К., Смирнова Н.Г., Агафонова М.В. Численное исследование структуры течения и теплообмена при закрученном течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (43). С. 80–93.
34. Матвиенко О.В. Численное исследование течения неньютоновских жидкостей в цилиндрическом канале // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8-2. С. 183–189.
35. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Numerical investigation of Herschel - Bulkley fluids mixing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering. Сер. «International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014». 2015. 012034.
36. Матвиенко О.В. Исследование теплообмена и формирования турбулентности во внутреннем закрученном потоке жидкости при низких числах Рейнольдса // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 4. С. 908–918.
37. Матвиенко О.В., Асеева А.Е. Математическое моделирование закрученного потока термовязкой псевдопластической жидкости Сиско в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 4. С. 857–869.
38. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Математическое исследование сепарации дисперсной фазы в гидроциклоне при очистке вязкопластических буровых растворов // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 2. С. 243–252.
39. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Дульзон Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока вязкопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 5. С. 1129–1137.
40. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Асеева А.Е. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости Балкли – Гершеля в цилиндрическом канале. Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 1. С. 215–226.
41. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Асеева А.Е. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости Балкли – Гершеля в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 6. С. 2641–2651.
42. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 3. С. 544–547.
43. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Южанова Н.К. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 1. С. 192–199.
44. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
45. Van Doormal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows // Numerical Heat Transfer. 1984. V. 7. P. 147–163.

REFERENCES

1. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Arutyunyan E.R. Matematicheskoye modelirovaniye sdvigoustoychivosti asfal'tobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog [Mathematical modelling of road pavement shear-resistance]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 4 (63). Pp. 158–170. (rus)
2. Babak O.G., Starkov G.B. Primeneniye modifitsirovannykh vyazhushchikh v dorozhnom stroitel'stve [Application of modified binders in road construction]. *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii*. 2001. No. 5. Pp. 72–75. (rus)
3. Galdina V.D. Modifitsirovannyye bitумы [Modified bitumen]. Omsk: SibADI, 2009. 228 p. (rus)
4. Matvienko O.V., Unger F.G., Bazuev V.P. Matematicheskiye modeli proizvodstvennykh protsessov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mathematical models of manufacturing processes for preparation of dispersed bitumen systems]. Tomsk: TSUAB, 2015. (rus)
5. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. V. 224. Pp. 72–112.
6. Rusakov M.N., Ismailov A.M. Stirol-butadiyen-stirol'nyye polimery dlya avtodorozhnogo stroitel'stva v Rossiyskoy Federatsii. [Styrene-butadiene-styrene polymers for road construction in the Russian Federation]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2020. No. 87. DOI: 10.18720/CUBS.87.3 (rus)
7. Sybilski D. Non-Newtonian viscosity of polymer-modified bitumen. *Materials and Structures*. 1993. V. 26. Pp. 15–23. DOI:10.1007/BF02472233
8. Gabriela C.C., Glicerio T., Joao V.S.M., Matheus F.M., Liseane P.T., Lidia C.L. Evaluation of rheological behavior, resistance to permanent deformation and resistance to fatigue of asphalt mixtures modified with nano-clay and SBS polymer. *Applied Sciences*. 2019. No. 9. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/app9132697
9. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Chislennoye issledovaniye perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennikh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh. [Numerical investigation of transition to the turbulent mode of internal swirl flows of bitumen binders]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
10. Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P. Issledovaniye dinamiki puzyr'ka v zakruchennom potoke nelineynno-vyazkoy zhidkosti. [Bubble dynamics in swirling flow of nonlinear viscous fluid]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 144–156. (rus)
11. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Eksperimental'noye issledovaniye protsessa kavitatsii v tekhnologicheskikh ustroystvakh. [Experimental study of cavitation process using technological devices]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. P. 165–176. (rus)
12. Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtyushkin E.V. Chislennoye modelirovaniye raspada turbulentnoy strui v sputnom zakruchennom potoke. [Numerical modeling of turbulent jet decay in wake swirling flow]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2006. V. 49. No. 6. Pp. 96–107. (rus)
13. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Turkasova N.G., Baygulova A.I. Issledovaniye protsessa modifikatsii bituma v inzhektorom smesitele. [Bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 202–213. (rus)
14. Bazuev V.P., Matvienko O.V., Voronenko V.L. Modelirovaniye protsessa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitel'nom dispergatore. [Modeling of bitumen modification in cavitation mixing disperser]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
15. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Smirnova N.G., Pushkareva G.V., Dulzon N.K. Issledovaniye smesheniya koaksial'nykh zakruchennykh potokov dlya prigotovleniya bitumnykh dispersnykh sistem [Mixing coaxial swirl flows for preparation of dispersed bitumen systems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 3 (44). Pp. 123–134. (rus)
16. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Chislennoye issledovaniye protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyr'kov v smesitel'nom ustroystve [Numerical calculation of

- cavitation bubble formation in a mixing device]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4 (45). Pp. 231–245. (rus)
17. Garcia E.J., Steffe J.F. Comparison of friction factor equations for non-Newtonian fluids in pipe flow. *Journal of Food Process Engineering*. 1986. V. 9. No. 2. Pp. 93–120.
 18. Benedict R.P., Carlucci N.A., Swetz S.D. Flow losses in abrupt enlargements and contractions. *Journal of Engineering for Power*. 1966. V. 88. No. 1. Pp. 73–81.
 19. Abdelall F.F. Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005. V. 29. No. 4. Pp. 425–434.
 20. Ryltsev I.A., Ryltseva K.E., Shrager G.R. Kinematika techeniya stepennoy zhidkosti v trube peremennogo secheniya [Kinematics of power-law fluid flow in a pipe with varying cross section]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2020. V. 63. Pp. 125–138. (rus)
 21. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Sabylina N.R., Aseeva A.E., Surtaeva A.A. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vyazkoplasticheskogo bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu Shvedova–Bingama, v tsilindricheskoi trube [Shvedov-Bingham model of steady flow of visco-plastic bitumen binder in cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 3. Pp. 158–177. (rus)
 22. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Litvinova A.E. Techenie bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu ostval'da – de veilya, v tsilindricheskoi trube [Liquid asphalt binders in cylindrical tube in terms of the Ostwald-de Waele model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 129–144. (rus)
 23. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Cherkasov I.S., Aseeva A.E. Issledovanie gidravlicheskiy kharakteristik potoka vodno-peschanoy suspenzii v trube [Hydraulic properties of sand slurry flow in a pipe]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020. V. 22. No. 2. Pp. 171–192. (rus)
 24. Matvienko O.V. Issledovaniye ustanovivshegosya techeniya psevdoplasticheskoy zhidkosti, opisyvayemoy model'yu Sisko, v tsilindricheskoy trube [Sisco model of steady state flow of pseudoplastic fluid in a cylindrical tube]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2018. No. 55. Pp. 99–112. (rus)
 25. Matvienko O.V., Litvinova A.E. Issledovanie ustanovivshegosya techeniya vysokoparafinistogo bitumnogo vyazhushchego, opisyvaemogo model'yu balkli – gershelya, v tsilindricheskoi trube [Steady flow of high-paraffin bituminous binder in cylindrical tube in terms of Herschel–Bulkley fluid]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 79–99. (rus)
 26. Matvienko O.V., Litvinova A.E., Firsanov N.S. Issledovanie raskhodnykh kharakteristik ustanovivshegosya techeniya vysokoparafinistogo bitumnogo vyazhushchego v tsilindricheskoi trube [Stabilized flow rate of high-paraffin asphalt cement in cylindrical pipe]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021. V. 23. No. 5. Pp. 71–85. (rus)
 27. Malkin A.Y., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya [Rheology: Concepts, methods, applications]. Saint-Petersburg: Professia, 2007. 560 p. (rus)
 28. Wilkinson W.L. Nen'yutonovskie zhidkosti [Non-Newtonian fluids]. Moscow: Mir, 1964. (transl. from Engl.)
 29. Kutepov A.M., Polyani L.D., Zapryanov Z.D., Vyaz'min A.V., Kazenin D.A. Khimicheskaya gidrodinamika [Chemical hydro-dynamics]. Moscow: Bureau Quantum, 1996. (rus)
 30. Klimov D.M., Petrov A.G., Georgievsky D.V. Vyazkoplasticheskiye techeniya: dinamicheskiy kaos, ustoychivost' i peremeshivaniye [Viscoplastic flows: Dynamic chaos, stability and mixing]. Moscow: Nauka, 2005. (rus)
 31. Loitsyansky L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Nauka, 1974. (rus)
 32. Cross M.M. Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1965. V. 20. Pp. 417–437.
 33. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V. Chislennoye issledovaniye struktury techeniya i teploobmena pri zakruchennom techenii bitumno-dispersnykh

- sistem v tsilindricheskikh kanalakh. [Numerical calculation of flow structure and heat transfer for swirling flow of bitumen dispersed systems in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2 (43). P. 80–93. (rus)
34. Matvienko O.V. Chislennoye issledovaniye techeniya nen'yutonovskikh zhidkostey v tsilindricheskom kanale. [Numerical investigation of the flow of non-Newtonian fluids in a cylindrical channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2014. V. 57. No. 8-2. Pp. 183–189. (rus)
 35. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Smirnova N.G. Numerical investigation of Herschel–Bulkley fluids mixing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Advanced Materials in Construction and Engineering*. 2015. 012034.
 36. Matvienko O.V. Issledovaniye teploobmena i formirovaniya turbulentnosti vo vnutrennem zakruchennom potoke zhidkosti pri nizkikh chislakh Reynol'dsa [Heat transfer and formation of turbulence in internal swirling fluid flow at low Reynolds number]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 4. Pp. 908–918. (rus)
 37. Matvienko O.V., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye zakruchennogo potoka termov'yazkoy psevdoplasticheskoy zhidkosti Sisko v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of thermal viscous, pseudoplastic Sisco fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2020. V. 93. No. 4. Pp. 827–838. (rus)
 38. Matvienko O.V., Evtushkin E.V. Matematicheskoye issledovaniye separatsii dispersnoy fazy v gidrotsiklone pri oчитке vyazkoplasticheskikh burovnykh rastvorov [Mathematical investigation of dispersed phase separation in hydrocyclone during viscoplastic mud cleaning]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2011. V. 84. No. 2. Pp. 243–252. (rus)
 39. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dulzon N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka vyazkoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 5. Pp. 1129–1137. (rus)
 40. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti Balkli–Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic Bulkley–Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. V. 92. No. 1. Pp. 215–226. (rus)
 41. Matvienko O.V., Bazuyev V.P., Aseeva A.E. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti Balkli–Gershelya v tsilindricheskom kanale [Mathematical simulation of swirling flow of dilatant Bulkley–Herschel fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. V. 92. No. 6. Pp. 2641–2651. (rus)
 42. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale. [Mathematical modeling of swirling flow of pseudoplastic fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2011. V. 84. No. 3. Pp. 544–547. (rus)
 43. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoy zhidkosti v tsilindricheskom kanale. [Mathematical modeling of swirling flow of dilatant fluid in cylindrical channel]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2014. V. 87. No. 1. Pp. 192–199. (rus)
 44. Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teplomassoobmena i dinamiki zhidosti [Numerical simulation of heat and mass transfer and fluid dynamics]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. (rus)
 45. Van Doormal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. *Numerical Heat Transfer*. 1984. V. 7. Pp. 147–163.

Сведения об авторах

Матвиенко Олег Викторович, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, matvolegv@mail.ru

Литвинова Алёна Евгеньевна, аспирант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, alena.aseeva.93@mail.ru

Фирсанова Наталья Сергеевна, аспирант, Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, firnataliya@yandex.ru

Authors Details

Oleg V. Matvienko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, matvolegv@mail.ru

Alyona E. Litvinova, Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, alena.aseeva.93@mail.ru

Nataliya S. Firsanova, Research Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, firnataliya@yandex.ru

УДК 624.21.014

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-169-177

*Б.С. СЕМУХИН,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТАХ

Аннотация. В настоящей статье в качестве объектов исследования взяты стальные конструкции автодорожных мостов.

Рассмотрены задачи построения многомерных динамических эпюр напряжений в стальных автодорожных мостах, решение которых позволяет анализировать и делать качественные и количественные выводы по безаварийной работе сложно нагруженных конструкций.

Предложено описывать пространственное распределение механических напряжений в строениях и конструкциях путем экспериментального их определения в процессе работы при различных нагрузках и одновременно с этим строить статистические распределения для разных точек и зон объекта. Для решения такой задачи были проведены измерения напряжений акустическим методом в процессе работы моста и построены математические распределения для всех измеренных точек.

Показано, что при определении всего массива нагрузок можно получить критерий безаварийной работы мостовых элементов и всей конструкции в целом. Для этого производится построение математических распределений.

Вводится еще один параметр критерия – X^2 . Отмечено, что реальное трехмерное распределение хорошо описывает работу различных узлов, деталей, частей стальных автодорожных мостов.

Полученные выводы подтверждают нашу гипотезу о возможности такого описания.

Ключевые слова: математическое распределение, многофакторная задача, динамические напряжения, строительные конструкции

Для цитирования: Семухин Б.С. Исследование полей напряжений в стальных автодорожных мостах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 169–177.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-169-177

*B.S. SEMUKHIN,**Tomsk State University of Architecture and Building*

STRESS FIELDS IN STEEL BRIDGES

Abstract. The paper deals with steel structures of road bridges. Multidimensional dynamic stress diagrams are suggested for steel road bridges. The analysis and quantitative conclusions are presented for the trouble-free operation of complex loaded structures. The paper describes the spatial distribution of mechanical stresses in buildings based on the obtained data on the operation under various loads and the statistical distribution of different points and zones of the object. Acoustic stress measurements are carried out during the bridge operation, and mathematical distributions are obtained for all measured points. It is shown that in determining the entire array of loads, a criterion can be identified for the trouble-free operation of bridge elements and the structure as a whole. Mathematical distributions are obtained or all measured points. The criterion parameter X^2 is introduced. It is found that the real three-dimensional distribution clearly describes the operation of various units and parts of steel road bridges. The findings confirm the proposed hypothesis about the possibility of such a description.

It is noted that the real three-dimensional distribution well describes the work of various nodes, parts, parts of steel road bridges.

The findings confirm our hypothesis about the possibility of such a description.

Keywords: mathematical distribution, multifactorial problem, dynamic stress, building

For citation: Semukhin B.S. Issledovanie polei napryazhenii v stal'nykh avtodorozhnykh mostakh [Stress fields in steel bridges]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 169–177.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-169-177

Введение

При проектировании современных мостовых конструкций, обладающих большими габаритами, конструкторы всячески стремятся уменьшить их вес, что приводит к изменению действующих в конструкции напряжений. К тому же использование новых композиционных материалов значительно усложняет анализ полей напряжений. Вес моста определяет, естественно, самую полную эпюру напряжений работающих конструкций [1–3]. Много работ посвящено таким проблемам, как связь степеней неравномерности «напряжения – деформации» с механическими свойствами материала труб. Также регулярно публикуются отчеты по моделированию полей напряжений в самой актуальной нефтегазоперекачивающей отрасли [5, 7].

В статьях за последние годы уделяется большое внимание проблемам остаточных действующих напряжений и влиянию остаточных напряжений на механические свойства [2, 3]. Определены четыре теоретически возможных вида распределений остаточных напряжений по толщине тонких холоднодеформированных изделий. Результаты получены при исследовании разных видов диаграмм зависимости напряжений от интенсивности деформаций. Полученные теоретические зависимости подтверждены экспериментальными исследованиями.

Показано, что наличие кривизны полей напряжений практически всегда приводит к появлению дополнительных изгибающих моментов и увеличению сжимающих и растягивающих продольных напряжений. Отклонение экспериментальных данных от нормального закона не влияет на качественный вывод, и его часто можно использовать в качестве первого приближения. При этом нередко оказывается, что подобное приближение дает удовлетворительные с точки зрения конкретных целей результаты. В настоящее время методики прогнозирования остаточного ресурса газопроводов, учитывающие фактический спектр изменения внешних нагрузок и процессы накопления от них усталостных повреждений в стенке трубы, отсутствуют [Там же].

Имеются статьи по оценке остаточного ресурса металлических мостов, по анализу характера нагрузок и напряженно-деформированного состояния коэффициента интенсивности напряжения и коэффициента трещиностойкости при нагружениях. Предложены зависимости параметров напряженно-деформированного состояния [4].

Распределение напряжений в строительных элементах мостовых сооружений в период монтажа может значительно отличаться от полей напряжений во время эксплуатации законченного объекта. Таким образом, возникает необходи-

мость разработки критерия распределения напряжений в одно-, двух- и трехмерных схемах. Однако это свойство распределения напряжений практически не отмечается в литературе. Поэтому актуальность и новизна настоящей работы заключалась в поисках экспериментальных данных, однозначно показывающих, как распределяются напряжения разной мерности, производится построение одно-, двух- и трехмерных зависимостей. В качестве промышленного образца выбрана система распределения напряжений в стальных автомобильных мостах. Хорошо известно, что автодорожный мост – достаточно простой технический объект, и обычно рассматривается работа конструкций при статических нагрузках. А все мосты – это конструкции, работающие при динамических нагрузках. Поэтому следующей процедурой становится задача построения эпюр динамических нагрузок. Отметим, что это более трудная задача по сравнению вышеупомянутыми напряжениями в трубах нефтегазопроводов. Таким образом, после построения графиков при динамической нагрузке можем выбрать уровень достоверности. Такую процедуру обеспечивает единственная на сегодняшний день методика математических распределений, которая обеспечивает нейтральную оценку напряжений. Последний шаг – это выбор типичных распределений и присвоения маркера главного распределения.

Приборы и методы эксперимента

В качестве неразрушающего метода контроля был выбран акустический метод измерения скорости звука для последующего перерасчета в напряжения. Отметим, что такая методика была разработана и проверена при аттестации различных автомобильных мостов доцентами ТГАСУ П.А. Катцыным и Б.Г. Акимовым. Они показали возможность ее использования на самых различных металлических автомобильных мостах, причем в одном из самых сложных по климатическим условиям месте страны – Западной Сибири. Ими была разработана и аттестована методика выполнения измерений (МВИ) («Напряжения в металлических конструкциях мостов и сооружений», 2002 г.). Акустический прибор, использованный в работе, позволял с высокой точностью измерять скорость ультразвука в исследуемом месте конструкции, т. е. локально изучать распределение напряжений.

Для построения самых различных полей напряжений необходимо проанализировать возможность измерения скорости звука во всех критически важных местах любой конструкции мостов. Это можно сделать по следующей схеме:

1. Вырезать из металла моста необходимое число образцов. Для получения наиболее достоверных значений их число не может быть менее 3–10 для одной точки и столько же для оценки влияния температуры. Наиболее ответственные узлы конструкции требуют еще большего числа образцов.

2. Построить, используя лабораторную технику, градуировочные графики для всех образцов.

3. Найти и решить уравнения, связывающие напряжения с деформацией и скоростью звука для всех измеряемых точек.

Считается что в практике большинства измерений все напряжения мостов упругие и определяются законом Гука, т. е. прямо пропорциональной зависимостью. Однако, как следует из большого количества статей, примерно 90–95 %

конструкций уже при изготовлении их в заводских условиях подвергаются сильным деформациям, что приводит к переходу стали моста из пластической в упруго-пластическую область, причем многие конструкции переходят практически в зону пластичности при некоторых природных условиях (низких или высоких температурах). Напряжения определяют путем перерасчета скорости звука в напряжения [8, 9].

В результате испытаний (измерений) мостовых конструкций возможно построить поля напряжений для любых частей моста. Предполагаем, что такие поля позволяют рассчитывать и использовать критерий прочности и надежности для любой мостовой конструкции.

Построение распределений напряжений в мостах

Для определения напряженного состояния металлических балок автодорожных мостов было проведено испытание главных балок Коммунального моста через р. Томь в г. Томске. Испытание проводилось в середине восьмого пролета. При проведении измерений движение по мосту не прерывалось. По полученным при испытании измерениям построена эпюра нормальных напряжений в заданном сечении балки (рис. 1).

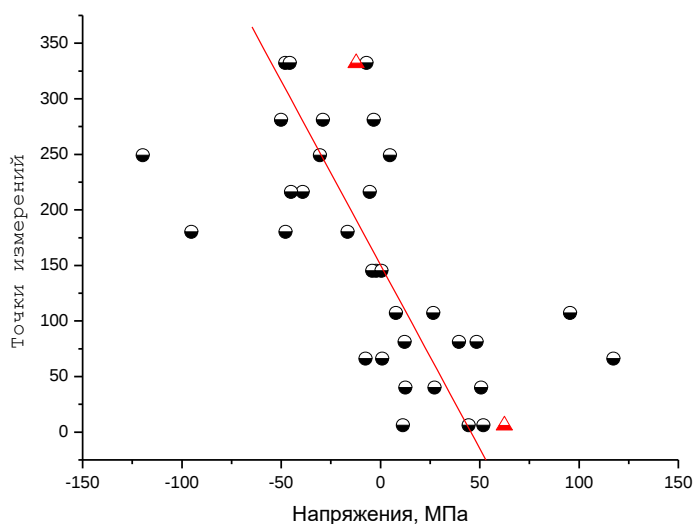


Рис. 1. Эпюра нормальных напряжений в заданном сечении балки моста (р. Томь, Томск, Коммунальный мост)

В результате анализа полученной эпюры напряжений установлено, что данным методом зафиксированы нормальные напряжения от собственного веса конструкции в крайних контрольных точках, причём значения напряжений достаточно близки к расчетным. Выбросы значений напряжений по полученной эпюре соответствуют местам расположения горизонтальных рёбер жёсткости и продольного заводского сварного шва стенки.

Описанным методом были оценены напряжения в конструкциях при испытании виадука через ручей Змеинка на 156-м км автомобильной дороги

Алтай – Кузбасс. При освидетельствовании мостового путепровода установлено распределение действующих и остаточных напряжений в нем и подтверждена возможность его безаварийной дальнейшей эксплуатации. Однако полученные эпюры не позволяли выработать какой-либо критерий прочности и надежности как для всей конструкции в целом, так и для локальных, но больших участков конструкции. Кроме того, было не ясно, в каких местах и как ведут себя поля напряжений в процессе эксплуатации, т. е. при динамических периодических нагрузках. Для решения таких задач предложено построение распределений массивов полей напряжений. На рис. 2 представлено такое распределение для виадука. Для исследуемого массива характерно существенное неоднородное распределение напряжений.

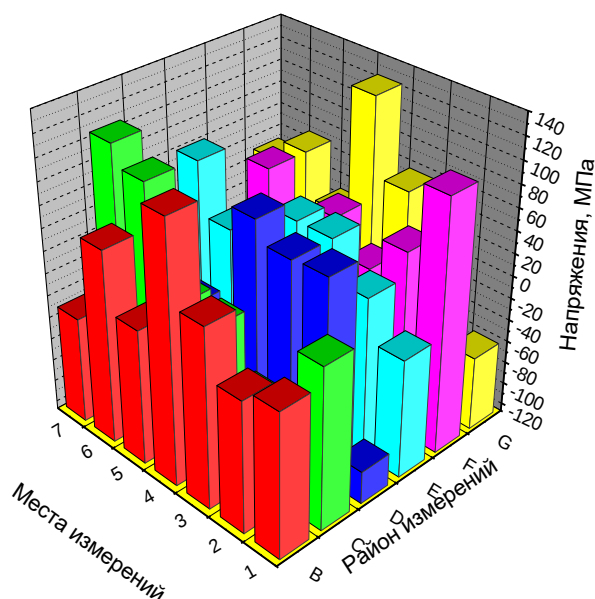


Рис. 2. Распределение массивов полей напряжений

Рассмотрим отдельно эти участки. На рис. 3 хорошо видно, что на всей длине виадука имеет место распределение напряжений локального характера. Очевидно, что большая нагрузка при работе и долгое время работы конструкций заставляют структурные элементы в стали 09Г2С перераспределяться с целью более прочной связи этих элементов друг с другом. К такому перераспределению приводит самоорганизация локальных напряжений. Таким образом, для любого состояния мостовой конструкции распределение напряжений состоит из двух частей: на концах конструкции, как правило, распределение нормальное, по Гауссу, а распределения между ними не описываются.

С помощью программы Origin были построены распределения напряжений и рассчитаны вероятность и коэффициент корреляции. В случае такого распределения (рис. 3) получаем высокий коэффициент корреляции и возможность применения χ^2 (хи-квадрат) распределения. Таким же образом нами построены распределения напряжений во всех трех мостах.

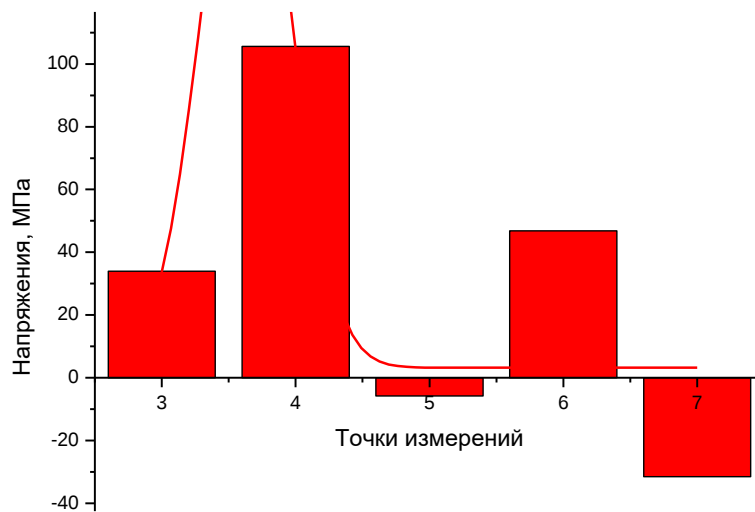


Рис. 3. Локальные распределения массивов полей напряжений при статической нагрузке

Из графических распределений (χ^2/DoF 1091, 43047; R^2 0,85246) видно, что имеются серьезные отличия как по величине напряжений, так и по месту образования, хотя все они удовлетворяют χ^2 (хи-квадрат) распределению и могут считаться нормальными распределениями по Гауссу.

Распределения напряжений при динамической нагрузке подобны напряжениям при статической нагрузке. Единственное, что их различает, – картина распределения, смещающаяся по длине конструкции (рис. 4).

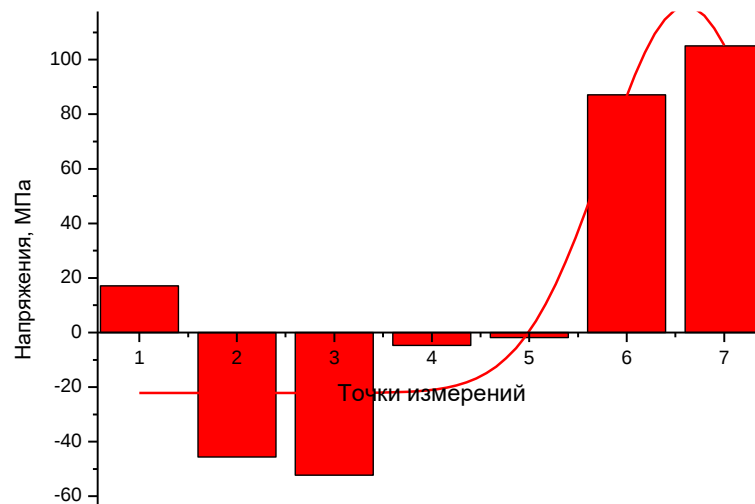


Рис. 4. Распределение напряжений при динамической нагрузке

Исходя из зависимости напряжений, отмечаем, что при динамических нагрузках отличий между разными участками значительно больше, чем при

статических. Таким образом, ясно, что при определении коэффициента корреляции и χ^2 (хи-квадрат) анализе можно различать наиболее опасные участки моста при нагрузках в разное время и при разных температурах [1, 8, 9]. Для всех стадий эксплуатации можно утверждать подчиненность количественно хи-квадрат распределению.

Особо надо выделить построение трехмерных распределений. На рис. 5 представлен такой объемный пример для виадука. Отчетливо можно выявить опасные зоны на разных стадиях эксплуатации. Однако, как показывает практический опыт, достоверность даже такого нормального распределения бывает завышенной [4–7].

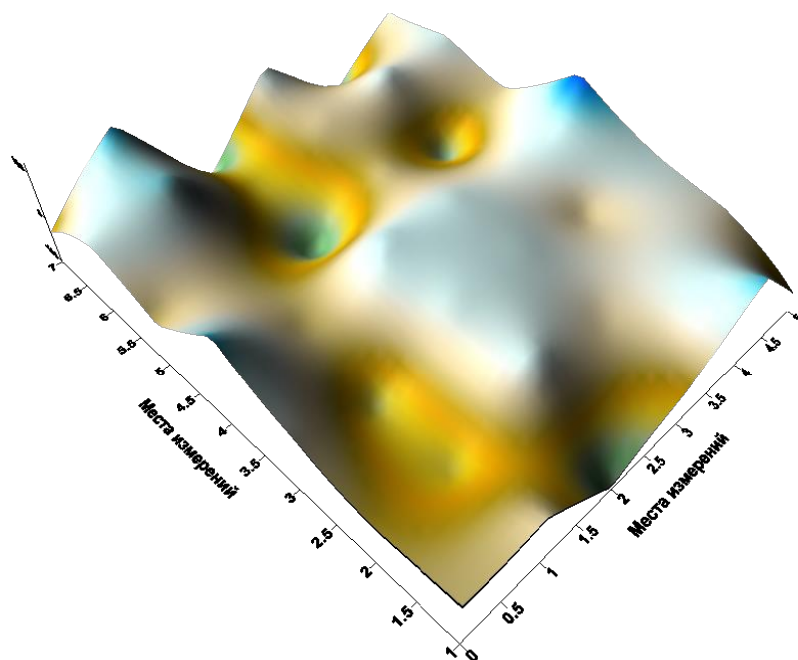


Рис. 5. Объемное распределение динамических напряжений (виадук)

Это возможно по следующим причинам:

- 1) слишком большие объемы измеренных данных;
- 2) измеренные данные получены не прямыми измерениями;
- 3) данные не могут использоваться при наличии действия внешних непроверяемых методик измерений;
- 4) МВИ для разных металлов различаются на очень маленькие значения измеряемых величин, что не позволяет их использовать.

Поэтому еще при разработке методов расчета распределения пришли к заключению о необходимости нормировки данных.

Сначала проводят анализ на наличие ошибок и отбраковывают недостоверные данные. Затем выбирают то распределение, под которое строят распределение. А далее нормируют данные путем деления всех значений по всем уровням на максимальное значение и строят распределения первого и второго

уровня. По формуле применим способ минимизации среднеквадратичного отклонения. Функция будет иметь вид

$$F = 1 - \Sigma(K_{\max} - K_i)^2,$$

где K_i – среднеквадратичное отклонение в квадрате; $K_{\max}$ – максимальный коэффициент измеренного параметра.

Удастся получить аналитическую зависимость, по минимумам которой можно найти распределение, позволяющее оценить надежность данного моста. Таким образом, можно предлагать новый критерий надежности стальных автодорожных мостов. Он формулируется так: наличие на концах балки, фермы и т. д. хорошего нормального распределения и там же высокого коэффициента корреляции и хи-квадрат коэффициента обеспечивают доказательства надежности и живучести объекта.

Выводы

В результате проведения анализа действующих напряжений в стальных автодорожных мостах было получено поле таких величин.

Построены динамические распределения для разных сталей и мостов.

Установлен факт связи коэффициента корреляции с величиной и временем нагрузки.

Разработан новый критерий надежности для стальных автодорожных мостов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семухин Б.С. Динамические напряжения автомобильных мостовых металлических сооружений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 170–176. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-4-170-176>
2. Новак А.Г., Трофимов В.А., Шванова М.Л. Математическое моделирование полей деформаций и напряжений в дисковых оптических элементах // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75) С. 5–11.
3. Третьяков Е.М. Остаточные напряжения в холоднодеформированных тонких изделиях и в тонколистовом дросселированном металле // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 49–61.
4. Козлов В.А. Напряженно-деформированное состояние многосвязных призматических конструктивных элементов мостовых сооружений // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 4. С. 110–117.
5. Сызранцев В.Н., Антонов М.Д. Восстановление функции плотности распределения предельных напряжений материала газопровода на основе значений их квантильных оценок // Газовая промышленность. 2020. № 12 (810). С. 86–93.
6. Трусов П.В., Соколов А.С. Двухуровневая упруговязкопластическая модель: анализ влияния распределения ориентаций кристаллитов в отсчетной конфигурации и сложности нагружения на поведение поликристаллических материалов // Вычислительная механика сплошных сред. 2021. Т. 14. № 4. С. 398–412.
7. Картопольцев В.М., Боровиков А.А., Картопольцев А.В. Оценка остаточного ресурса конструкций металлических мостов по критерию трещинообразования // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (49). С. 176–183.
8. Акимов Б.Г., Катцын П.А., Гавриленко С.М., Семухин Б.С., Андреев М.И., Шурыгин Ю.А. Акустический метод определения напряжений и состояние металла в мостовых конструкциях // Наука и техника в дорожной отрасли. 2001. № 4. С. 22–26.

9. Катцын П.А., Семухин Б.С., Акимов Б.Г., Чиков С.А. Применение ультразвуковых методов для оценки напряженного состояния мостовых конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2000. № 2. С. 257–264.

REFERENCES

1. Semukhin B.S. Dinamicheskie napryazheniya avtomobil'nykh mostovykh metallicheskiykh sooruzheniy [Dynamic stress in automobile bridgeworks]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. No. 4. Pp. 170–176. (rus)
2. Novak A.G., Trofimov V.A., Shvanova M.L. Matematicheskoe modelirovaniye polei deformatsii i napryazheniy v diskovykh opticheskikh elementakh [Mathematical modeling of deformation and stress fields in disk optical elements]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2011. No. 5 (75). Pp. 5–11. (rus)
3. Tretyakov E.M. Ostatochnyye napryazheniya v kholodnodeformirovannykh tonkikh izdeliyakh i v tonkolistovom dressirovannom metalle [Residual stresses in cold-formed thin products and in thin-sheet trained metal]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2008. No. 1. Pp. 49–61. (rus)
4. Kozlov V.A. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye mnogosvyaznykh prizmaticheskikh konstruktivnykh elementov mostovykh sooruzheniy [Stress-strain state of multi-connected prismatic structural elements of bridge structures]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2011. No. 4. Pp. 110–117. (rus)
5. Syzrantsev V.N., Antonov M.D. Vosstanovleniye funktsii plotnosti raspredeleniya predel'nykh napryazheniy materiala gazoprovoda na osnove znacheniy ikh kvantil'nykh otsenok [Restoration of distribution density function of limiting stresses in gas pipeline material based on their quantile estimates]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2020. No.12 (810). Pp. 86–93. (rus)
6. Trusov P.V., Sokolov A.S. Dvukhurovnevaya uprugovyazkoplasticheskaya model': analiz vliyaniya raspredeleniya orientatsii kristallitov v otschetnoi konfiguratsii i slozhnosti nagruzheniya na povedeniye polikristallicheskiykh materialov [Two-level elastic-viscoplastic model: Analysis of orientation distribution of crystallites in the reference configuration and complexity of loading depending on polycrystalline material behavior]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2021. V. 14. No. 4. Pp. 398–412. (rus)
7. Kartopoltsev V.M., Borovikov A.A., Kartopoltsev A.V. Otsenka ostatochnogo resursa konstruktitsii metallicheskiykh mostov po kriteriyu treshchinoobrazovaniya [Residual life of metal bridge structures estimated by crack formation]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 2 (49). Pp. 176–183. (rus)
8. Akimov B.G., Katsyn P.A., Gavrilenko S.M., Semukhin B.S., Andreev M.I., Shurygin Yu.A. Akusticheskiy metod opredeleniya napryazheniy i sostoyaniya metalla v mostovykh konstruktitsiyakh [Acoustic method for stress state identification in metal bridge structures]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2001. No. 4. Pp. 22–26. (rus)
9. Katsyn P.A., Semukhin B.S., Akimov B.G., Chikov S.A. Primeneniye ul'trazvukovykh metodov dlya otsenki napryazhennogo sostoyaniya mostovykh konstruktitsii [Application of ultrasonic methods for assessing the stress state of bridge structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2000. No. 2. Pp. 257–264. (rus)

Сведения об авторе

Семухин Борис Семенович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Author Details

Boris S. Semukhin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

УДК 624.046.2:666.96

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-178-188

*В.Н. ЛУКАШЕВИЧ, О.Д. ЛУКАШЕВИЧ, Р.И. МОКШИН,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НА АСФАЛЬТЕНОГЕНЕЗ В ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

Аннотация. Актуальность работы предопределена потребностью разработки технологий производства битумоминеральных композиций, позволяющих увеличить сроки службы конструктивных слоев дорожных одежд.

Процесс старения органического вяжущего начинается на стадии приготовления асфальтобетонной смеси и длится в течение всего периода эксплуатации конструктивного слоя. Он протекает в адсорбционно-сольватных оболочках битума на поверхности зерен минеральных материалов и сопровождается преобразованием масел в смолы, а смол – в асфальтены. Предложен новый термин «асфальтеногенез», характеризующий протекающий при старении процесс повышения концентрации асфальтенов. Его следствием является снижение содержания низкомолекулярных фракций в адсорбционно-сольватных оболочках битума и увеличение содержания высокомолекулярных фракций. Пленки битума становятся более вязкими, при отрицательных температурах повышается их хрупкость, увеличивается интенсивность трещинообразования. В результате дорожные одежды, запроектированные и построенные с учетом требований действующей нормативной документации, деформируются и разрушаются, не выдерживая установленных сроков службы. Показано, что применение технологии дисперсного армирования конструктивных слоев дорожных одежд химическими волокнами, полученными из отработанных сорбентов, содержащими регулируемое количество поглощенных нефтепродуктов, может быть одним из путей решения этой проблемы.

Цель работы – исследование влияния технологии производства битумоминеральных композиций на изменение в них концентрации парамагнитных центров, которое служит индикатором содержания асфальтенов. Асфальтены являются главным местом сосредоточения парамагнитных центров. Измерение концентрации парамагнитных центров в дисперсной битумоминеральной композиции позволяет оценить количество асфальтенов и сделать вывод об интенсивности процесса старения дисперсной битумоминеральной композиции.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что рациональной является технология дисперсного армирования битумоминеральных композиций, предусматривающая введение сначала химических волокон, содержащих регулируемое количество поглощенных нефтепродуктов, а затем битума. Это приводит к снижению интенсивности избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов. Смеси, приготовленные по предлагаемой технологии, подвергшиеся старению в климатической камере, характеризуются уменьшением концентрации парамагнитных центров. Это свидетельствует о снижении интенсивности асфальтеногенеза и интенсивности старения битумоминеральной композиции.

Ключевые слова: битумоминеральные композиции, асфальтеногенез, асфальтены, электронный парамагнитный резонанс, парамагнитные центры, дисперсная арматура, нефтяной битум, волокнистые сорбенты, избирательная фильтрация, адсорбционные слои нефтяного битума

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокшин Р.И. Влияние технологии производства на асфальтеногенез в дисперсно-армированных битумо-

моминеральных композициях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 178–188.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-178-188

V.N. LUKASHEVICH, O.D. LUKASHEVICH, R.I. MOKSHIN,
Tomsk State University of Architecture and Building

MANUFACTURE-AFFECTED ASPHALTENE GENESIS IN DISPERSION HARDENED BITUMEN-MINERAL COMPOSITIONS

Abstract. The paper focuses on increasing the service life of the road pavement layers made of dispersion hardened organomineral mixtures through the aging intensity reduction of organic binder, which begins at the preparation stage of these mixtures and lasts during the structural layer operation. The organic binder generates adsorption-volute shells on the surface of mineral materials, which become more viscous and acquire increased brittleness. Crack formation becomes more intensive, pavement designed and built in accordance with the requirements destroys. Dispersion hardening of the pavement structural layers with chemical fibers from spent sorbents containing oil products, can be used to partially solve this problem.

The purpose of the work is to study the aging intensity of the binder in organomineral mixtures using electron paramagnetic resonance methods. The aging intensity of the organic binder is evaluated by the concentration of paramagnetic centers, since asphaltene are almost one hundred percent concentrate of paramagnets, which can serve as an indicator of the aging intensity of the petroleum dispersion system.

It is shown that dispersion hardening of the pavement layers by chemical fibers from spent sorbents containing absorbed oil products, decreases the concentration of paramagnetic centers, which indicates to the higher concentration of asphaltene, which, in turn, means a decrease in the aging intensity of the oil dispersion system.

Keywords: electronic paramagnetic resonance, free radicals, fibrous sorbents, petroleum bitumen components, clogged pores, adsorption layer, mineral material

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D., Mokshin R.I. Vliyanie tekhnologii proizvodstva na asfal'tenogenez v dispersno-aromirovannykh bitumomineral'nykh kompozitsiyakh [Manufacture-affected asphaltene genesis in dispersion hardened bitumen-mineral compositions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 178–188.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-178-188

Характерной особенностью битумоминеральных композиций (БМК) является их принадлежность к термопластичным материалам, что предопределяет как преимущества, так и недостатки их свойств. К основным преимуществам относят технологичность производства БМК, технологичность устройства конструктивных слоев дорожных одежд, простоту содержания и ремонта слоев из БМК. Основные недостатки БМК вытекают из свойств нефтяного битума, используемого в качестве вяжущего, или основного компонента, применяемого для получения органического вяжущего (эмульсий, мастик, композиционных вяжущих и т. д.). Использование нефтяного битума в составе БМК приводит к тому, что в летний период, при высоких положительных температурах, когда покрытие дорожной одежды нагревается до 60 °С и более, происходит существенное снижение сдвигоустойчивости конструктивного слоя. Под

воздействием подвижных нагрузок накапливаются необратимые сдвиговые деформации, что проявляется в колееобразовании, возникновении волнообразных наплывов, волн, других деформаций и даже разрушений. Это связано с тем, что адсорбционно-сольватные оболочки органического вяжущего, обеспечивающие связь между частицами минерального материала, включающие масла, смолы и асфальтены, под воздействием положительных температур становятся эластичными и слабо сопротивляются сдвиговым нагрузкам. Чем менее вязкий битум, тем интенсивнее протекают процессы, сопровождающиеся сдвиговыми деформациями в конструктивных слоях из БМК. В зимний период, при значительных отрицательных температурах, возможно образование трещин вследствие снижения эластичности пленок битума на поверхности минеральных материалов, что связано со старением битумо-минеральных композиций. Причинами старения являются физико-химические процессы, начинающиеся при производстве битумо-минеральных композиций и продолжающиеся в течение всего времени эксплуатации конструктивных слоев из этих материалов. К основным причинам старения можно отнести изменения фракционного состава органического вяжущего под влиянием природно-климатических факторов и процесс избирательной диффузии (фильтрации) компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов [1]. Профессор Л.Б. Гезенцевей отмечал: «...изменение компонентного состава приповерхностных слоев битума представляет собой одну из форм интенсивного старения битума, характерную для битумо-минеральных композиций...» [2, 3].

Природно-климатические факторы активно воздействуют на процессы старения битумо-минеральных композиций. Происходят изменения структуры битума, в ходе которых масла преобразуются в смолы, а старение смол сопровождается их преобразованием в асфальтены [4–7]. Эти преобразования являются необратимыми. Главную роль в них играют кислород воздуха, температура конструктивного слоя, испарения легких фракций мальтеновой части битума. Катализаторами этого процесса являются оксиды железа и алюминия (Al_2O_3 , Fe_2O_3) [8–11]. Назовем процесс роста содержания асфальтенов в битуме, протекающий при старении, асфальтеногенезом. В результате асфальтеногенеза содержание низкомолекулярных фракций (масла и смолы) уменьшается, а содержание высокомолекулярных фракций (асфальтенов) увеличивается, что отражено в работах D. Lesueur [12], F. Farcas [13], J.C. Petersen [14, 15], M.N. Siddiqui и M.F. Ali [16, 17], Y. Qi и F. Wang [18–20], F.A. Reyes с соавторами [21, 22] и многих других.

Указанные процессы приводят к изменению прочностных свойств битумо-минеральных композиций: повышаются прочность и модуль упругости, относительное удлинение при разрыве. Достигнув экстремума к 7–12 годам эксплуатации, они снижаются, и начинается интенсивный процесс разрушения [23].

Авторами работы [24] доказано, что в процессе старения при различных температурах содержание асфальтенов может изменяться от 17,89 до 40 %.

Потеря низкомолекулярных фракций приводит к тому, что адсорбционные слои нефтяного битума, которые обеспечивают когезионную связь между зернами минерального материала, теряют эластичность. Они становятся более хрупкими, особенно при отрицательных температурах. Трещиностойкость

конструктивных слоев дорожных одежд из битумоминеральных композиций снижается. В трещины проникает вода. Лед, образовавшийся при отрицательных температурах, расширяется, что приводит к разрушению конструктивных слоев и сокращению сроков их службы.

Из вышесказанного следует, что для уменьшения интенсивности старения конструктивных слоев дорожных одежд из органоинеральных смесей следует снизить интенсивность асфальтогенеза и нейтрализовать полуторные оксиды, катализирующие старение органического вяжущего. Это может быть достигнуто путем снижения интенсивности избирательной фильтрации, что, в свою очередь, снизит интенсивность фракционирования нефтяного битума. Ограничить избирательную фильтрацию (либо вовсе ее прекратить) возможно при использовании технологии дисперсного армирования [25–31]. Для снижения стоимости технологии предпочтительно применять отходы – отрезки химических волокон, полученных из волокнистых сорбентов, отработавших свой ресурс и содержащих регулируемое количество углеводородного сырья, собранного при ликвидации разливов, имеющих место в результате крушения танкеров, при авариях на нефтепроводах, буровых установках и т. д. [32]. При реализации предложенной автором [32] технологии возникает возможность двухстадийной обработки поверхности минеральных материалов органическими вяжущими.

Как показано в работе [32], на первой стадии целесообразно использовать органические вяжущие, обладающие высокой адгезией, на второй стадии – эффективной когезией. Именно поэтому при производстве органоинеральных композиций в минеральный материал необходимо вводить сначала дисперсную арматуру из волокнистых сорбентов. Содержащиеся в них собранные при ликвидации аварий органические материалы: нефть, мазут, смолы различного происхождения, сланцевые и каменноугольные фусы и т. д. – обладают высокой активностью и, вступая в химическое взаимодействие с поверхностями минеральных материалов, создают хемосорбционные связи, а проникая в поры и капилляры минеральных материалов, коагулируют их. При этом происходит модифицирование поверхностей минеральных материалов.

На второй стадии в смесь минерального материала с дисперсной арматурой вводится нефтяной битум. В связи с тем, что поры и капилляры минерального материала уже заполнены органическими материалами, вводимыми на первой стадии, процесс фракционирования компонентов нефтяного битума не будет иметь места. Следовательно, концентрация асфальтенов на поверхности минеральных материалов увеличиваться не будет, что является одной из форм снижения интенсивности асфальтогенеза, характеризующего переход масел в смолы, а смол в асфальтены в процессе старения конструктивного слоя. Кроме того, адсорбционно-сольватные оболочки битума не будут обедняться низкомолекулярными компонентами, по этой причине интенсивность асфальтогенеза также будет замедлена. Снижение интенсивности процесса фракционирования битума и процесса асфальтогенеза обеспечит эластичность адсорбционно-сольватных оболочек битума при отрицательных температурах и повысит трещиностойкость конструктивного слоя. Наличие же дисперсной арматуры увеличит сдвигоустойчивость конструктивного слоя дорожной одежды из битумоинеральных

материалов при высоких положительных температурах в летний период. В целом, вышеуказанные процессы структурообразования дисперсно-армированных битумо-минеральных композиций приведут к повышению сроков службы конструктивных слоев, выполненных из этих материалов.

В результате реализации предложенной технологии на поверхности минеральных материалов образуется суперпозиция (наложение) двух слоев органических вяжущих. После первой стадии на поверхности минерального материала образуется первый адсорбционный слой (слой вяжущего, содержащегося в волокнистых сорбентах), обеспечивающий высокую адгезию, кольматацию пор и исключение фракционирования битума (избирательную фильтрацию) на второй стадии. После второй стадии обработки на первый слой происходит наложение второго слоя – слоя битума. Этот слой битума обладает более высокой водостойкостью и защищает первый слой от воздействия влаги.

Выдвинутые теоретические предположения были проверены с применением методов электронного парамагнитного резонанса и люминесцентной битумологии.

Метод люминесцентной битумологии был применен для исследования процессов избирательной фильтрации компонентов органических вяжущих при их взаимодействии с поверхностью минеральных материалов [33]. Метод опирается на различия в характере люминесценции компонентов органических вяжущих под воздействием ультрафиолетовых лучей. Каждый компонент органического вяжущего люминесцирует своим цветом.

Авторами были исследованы тонкопористые известняки при их одностадийной обработке нефтяным битумом и тонкопористые известняки, подвергшиеся двухстадийной обработке – сначала сланцевой смолой, а затем нефтяным битумом [32]. Сланцевая смола была получена путем центрифугирования волокнистых сорбентов после их использования для ликвидации разлива сланцевых фусов.

Исследования расколотой щебенки из тонкопористого известняка с адсорбционной оболочкой из битума показали, что на поверхности щебенки адсорбируются преимущественно асфальтены. Смолы располагаются в слое, близком к поверхности. В то же время масла проникают вглубь тонкопористого материала. Наблюдается картина фракционирования (избирательной фильтрации) нефтяного битума.

Исследования щебенки, обработанной сланцевой смолой, показали, что процессы избирательной фильтрации также имеют место. Но компоненты сланцевой смолы проникают в минеральный материал глубже, люминесценция менее яркая, менее насыщена красками.

Исследования тонкопористого известняка, подвергшегося двухстадийной обработке (сначала сланцевой смолой, а затем нефтяным битумом), показали, что избирательная фильтрация компонентов нефтяного битума в поры и капилляры отсутствует, что является закономерным процессом, поскольку они уже заполнены компонентами сланцевой смолы на первой стадии обработки.

Применение методов люминесцентной битумологии позволило установить, что реализация технологии дисперсного армирования битумо-минеральных композиций, предусматривающая введение в смесь волокон из отработанных

сорбентов, содержащих регулируемое количество собранных нефтепродуктов, позволяет предотвратить либо снизить интенсивность избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов. Тем самым снижается интенсивность одной из форм асфальтогенеза.

Влияние процессов старения асфальтового вяжущего на интенсивность асфальтогенеза было исследовано с использованием методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР-спектроскопии).

В связи с тем, что асфальтены являются почти 100%-м концентратом парамагнитных центров [34–36], изменение концентрации парамагнитных центров в дисперсной битумо-минеральной композиции может свидетельствовать о содержании асфальтенов (а значит, об изменении интенсивности процесса асфальтогенеза) и быть показателем интенсивности процесса старения дисперсной битумо-минеральной композиции.

Для исследования использовался радиоспектрометр RADIOPAN SE/X-25-44 с рубиновыми стержнями в качестве квазивнутреннего эталона. Рабочий режим оборудования: частота – 9 ГГц, длина волны – 3,2 см. Исследовались минеральные материалы, представленные гранитом и известняком. Одностадийная обработка осуществлялась нефтяным дорожным битумом Ачинского НПЗ (марка БНД 90/130), двухстадийная – сначала сырой нефтью Первомайского месторождения Томской области, полученной после центрифугирования сорбентов, а после – указанным выше битумом.

Изучались смеси, полученные сразу после перемешивания, а также смеси, подвергнутые старению в термостабилизированной камере в течение шести часов. Результаты исследований представлены в таблице.

Зависимость концентрации парамагнитных центров от состава битумо-минеральных композитов и технологии их производства

№ п/п	Состав битумо-минерального композита и технология его получения	Количество парамагнитных центров в БМК, г ⁻¹	
		до старения	после старения
1	Гранит + Битум (одностадийная)	0,22·10 ¹⁷	0,7·10 ¹⁷
2	Гранит + Нефть + Битум (двухстадийная)	0,19·10 ¹⁷	0,26·10 ¹⁷
		Снижение на 14 %	Снижение на 63 %
3	Известняк + Битум (одностадийная)	3,6·10 ¹⁷	6,4·10 ¹⁷
4	Известняк + Нефть + Битум (двухстадийная)	0,4·10 ¹⁷	4,7·10 ¹⁷
		Снижение на 89 %	Снижение на 26 %

Анализируя данные, представленные в таблице, можно сделать следующие выводы. При введении нефти, полученной после центрифугирования дисперсной арматуры, снижается концентрация парамагнитных центров в минеральных материалах, представленных как кислыми (гранит), так и карбонатными (известняк) породами, сразу после приготовления БМК. Следовательно, уже на стадии производства технология дисперсного армирования отработана

ными сорбентами позволяет снизить интенсивность асфальтеногенеза в кислых породах на 14 %, а в карбонатных – на 89 %.

Процессы старения оказали очень существенное влияние на концентрацию парамагнитных центров и в гранитной, и в известняковой БМК. Однако общее количество парамагнитных центров снизилось в гранитном композите с $0,7 \cdot 10^{17}$ до $0,26 \cdot 10^{17} \text{ г}^{-1}$, фактически на 63 %. В то же время в известняковом композите снижение концентрации достигло только 26 %. При этом необходимо заметить, что интенсивность образования парамагнитных центров в процессе старения в известняковом композите существенно выше в случае введения нефти, поскольку изначальное снижение концентрации парамагнитных центров достигало 89 %. Это согласуется с результатами исследований, представленных в работах [22, 35], где отмечено, что чем выше первоначальная концентрация в битуме асфальтенов, тем меньше изменяется в процессе старения его химический состав.

Резюмируем, что использование люминесцентной битумологии позволило подтвердить вывод об эффективности дисперсного армирования битумо-минеральных композиций отрезками волокон, содержащих адсорбированные отходы нефтепродуктов, в отношении дальнейшего старения БМК благодаря снижению интенсивности избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов. Это является одной из форм снижения интенсивности процесса образования асфальтенов (асфальтеногенеза). Методом электронного парамагнитного резонанса доказано, что смеси, приготовленные по предлагаемой технологии, подвергшиеся старению в климатической камере, имеют более низкую интенсивность образования парамагнитных центров. Это также свидетельствует о более низкой интенсивности перехода смол в асфальтены, а следовательно, более низкой интенсивности процесса асфальтеногенеза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гезенцев Л.Б., Слива Г.Я. Избирательная фильтрация битумов при взаимодействии с минеральными порошками // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 98–105.
2. Гезенцев Л.Б., Горельшев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон / под ред. Л.Б. Гезенцева. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.
3. Гезенцев Л.Б., Колбанев И.В., Рвачева Э.М. Механо-химические процессы в битумо-минеральных системах // Автомобильные дороги. 1971. № 2. С. 6–9.
4. Бабаев В.И. Старение асфальтобетона в условиях юга России // Автомобильные дороги. 1994. № 3. С. 21.
5. Бахрах Г.С. Оценка термоокислительной стабильности асфальтовых материалов с учетом роли контактных взаимодействий // Труды Союздорнии. 1975. Вып. 79. С. 132–140.
6. Давыдова А.Р., Гладырь С.А., Телкова Т.Н. Исследование изменений, протекающих в битумах при их глубоком окислении // Труды Союздорнии. 1977. Вып. 100. С. 4–12.
7. Давыдова А.Р. Исследование процесса старения битума под влиянием различных факторов // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 48–54.
8. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. Москва : Транспорт, 1983. С. 129.
9. Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭЦ : справочное пособие. Москва : Энергоиздат, 1985. 285 с.
10. Методические рекомендации по технологии применения в асфальтобетоне отвалных золошлаковых смесей теплоэлектростанций. Москва : СоюздорНИИ, 1978. 23 с.

11. Чистяков Б.З., Лялинов А.Н. Использование минеральных отходов промышленности. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1984. 150 с.
12. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009. 145 (1–2). P. 42–82.
13. Sá da Costa M., Farcas F., Santos L.F., Eusébio M.I., Diogo A.S. Chemical and Thermal Characterization of Road Bitumen Ageing // *Materials Science Forum*. 2011. V. 636–637. P. 273–279. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.273>
14. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art // *Transportation Research Board*. Washington, DC, 999. 1984. P. 13–30.
15. Petersen J. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships // *Transportation Research E-Circular* (Vol. 1). Transportation Research Board. Washington, DC, 2009. 68 p.
16. Siddiqui M.N., Ali M.F. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts // *Fuel*. 1999. № 78 (9). P. 1005–1015.
17. Siddiqui M.N., Ali M.F. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt // *Fuel*. 1999. № 78 (12). P. 1407–1416.
18. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. I. Oxygen absorption behaviors and kinetics // *Petroleum Science and Technology*. 2003. V. 21 (1). P. 283–299.
19. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. Chemical group composition and structure changes // *Petroleum Science and Technology*. 2004. V. 22 (3). P. 263–274.
20. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. III. Average molecular structure parameter changes // *Petroleum Science and Technology*. 2004. V. 22 (3). P. 275–286.
21. Reyes F.A., Daza C.E., Rondon H.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column // *Revista EIA*. 2012. V. 17. P. 47–56.
22. Глотова Н.А., Горшков В.С., Кац Б.И. Изменение реологических свойств и химического состава битумов при старении // *Химия и технология топлив и масел*. 1980. № 4. С. 47–49.
23. Слободчиков Ю.В. Исследование влияния условий эксплуатации на надежность битумо-минеральных покрытий автомобильных дорог Северного Казахстана : автореферет диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1972. 32 с.
24. Mohammed A.A., Morshed K. The effect of ageing on physical and chemical properties of asphalt cement // *Iraqi journal of chemical and petroleum engineering*. 2008. V. 9. № 2. P. 9–15.
25. Пшеничных О.А., Скорик Д.С. Опыт применения дисперсно-армированных асфальтобетонов в дорожном строительстве // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. Вып. 141. С. 121–127.
26. Алишханов А., Калгин Ю.И. Улучшение структурно-механических свойств теплого асфальтобетона методом полимерно-дисперсного армирования // *Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей*. 2021. Вып. 61. С. 53–61.
27. Пшеничных О.А. Деформационно-прочностные характеристики дисперсно-армированных асфальтобетонов // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. Вып. 143. С. 41–44.
28. Мерзликин А.Е., Гамеляк И.П. Испытания конструкций дорожных одежд для оценки эффективности применения дисперсно-армированного асфальтобетона // *Труды Союздорнии*. Сер. Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд. 1990. С. 17–25.
29. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report // *Transp. Res. Rec.* 1983. № 916. P. 6–18.
30. Tessoneau H. Revement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisiene Voie Macon nord // *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988. V. 62. № 650. P. 77–78.
31. Pinaud Y., Hintzi J., Poirier J., Chanseaulme M. *Le Rugoflex*. Une experience de dix ans // *Revue generale des Routes et des Aerodromes*. 1988. № 649. P. 61–64.

32. Лукашевич В.Н. Увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий за счет двухстадийного введения органических вяжущих в процессе производства асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. № 1. С. 24–25.
33. Флоровская В.Н., Овчинникова Л.И. Люминесцентная микроскопия битуминозных веществ. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 80 с.
34. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР : пер. с англ. Москва : Мир, 1975. 368 с.
35. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. Новосибирск : Сибирская издательская фирма РАН «Наука», 1995. 192 с.
36. Железко Е.П., Печеный Б.Г. О кинетике образования и рекомбинации свободных радикалов в битумах // Труды Союздорнии. 1970. Вып. 46. С. 137–142.

REFERENCES

1. Gezentsvei L.B., Sliva G.Ya. Izbiratel'naya filtratsiya bitumov pri vzaimodeystvii s mineral'nymi poroshkami. [Selective filtration of bitumen in interacting with mineral powders]. *Trudy Soyuzdornii*. 1971. V. 44. Pp. 98–105. (rus)
2. Gezentsvei L.B. (Ed.), Gorelyshev N.V., Boguslavsky A.M., Korolev I.V. Dorozhnyy asfal'tobeton [Asphalt concrete]. 2nd ed., Moscow: Transport, 1985. 350 p. (rus)
3. Gezentsvei L.B., Kolbanev I.V., Rvacheva E.M. Mekhano-khimicheskie protsessy v bitumomineral'nykh sistemakh [Mechano-chemical processes in bitumen mineral systems]. *Avtomobilnye dorogi*. 1971. No 2. P.6–9. (rus)
4. Babaev V.I. Starenie asfal'tobetona v usloviyakh yuga Rossii [Aging of asphalt concrete in the south of Russia]. *Avtomobilnye dorogi*. 1994. No. 3. P. 21. (rus)
5. Bakhrakh G.S. Otsenka termookislitel'noi stabil'nosti asfal'tovykh materialov s uchetom roli kontaktnykh vzaimodeystvii [Assessment of thermal-oxidative stability of asphalt materials and the role of contact interactions]. *Trudy Soyuzdornii*. 1975. V. 79. Pp. 132–140. (rus)
6. Davydova A.R., Gladyr S.A., Telkova T.N. Issledovanie izmenenij, protekayushhix v bitumax pri ix glubokom okislenii [Study of changes in bitumen during deep oxidation]. *Trudy Soyuzdornii*. 1977. V. 100. Pp. 4–12. (rus)
7. Davydova A.R. Issledovanie processa stareniya bituma pod vliyaniem razlichnykh faktorov [Bitumen aging process under the influence of various factors]. *Trudy Soyuzdornii*. 1971. V. 44. Pp. 48–54. (rus).
8. Grushko I.M., Korolev I.V., Borshh I.M., Mishhenko G.M. Dorozhno-stroitel'nye materialy [Road building materials]. Moscow: Transport, 1983. 129 p. (rus)
9. Melentev V.A. Sostav i svoystva zoly i shlaka TETz: Spravochnoe posobie [Composition and properties of ash and slag from thermal power plants: Reference guide]. Moscow: Energoizdat, 1985. 285 p. (rus)
10. Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologii primeneniya v asfal'tobetone otval'nykh zoloshlakovykh smesey teploe'lektrostantsij [Guidelines for using waste ash and slag mixtures from thermal power plants in asphalt concrete]. Moscow: SoyuzdorNII, 1978. 23 p. (rus)
11. Chistyakov B.Z., Lyalinov A.N. Ispol'zovanie mineral'nykh otxodov promyshlennosti [Industrial mineral waste application]. Leningrad: Stroiizdat, 1984. 150 p. (rus)
12. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009. No. 145 (1-2). Pp. 42–82.
13. Sá da Costa M., Farcas F., Santos L.F., Eusébio M.I., Diogo A.S. Chemical and thermal characterization of road bitumen ageing. *Materials Science Forum*. 2011. V. 636–637. Pp. 273–279. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.273>
14. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art. Washington: Transportation Research Board, 1984. Pp. 13–30.
15. Petersen J. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships. Transportation Research E-Circular (Vol. 1). Transportation Research Board. 2009. 68 p.
16. Siddiqui M.N., Ali M. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts Siddiqui. *Fuel*. 1999. No. 78 (9). Pp. 1005–1015.

17. Siddiqui M.N., Ali M. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt. *Fuel*. 1999. No. 78 (12). Pp. 1407–1416.
18. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. I. Oxygen absorption behaviors and kinetics. *Petroleum Science and Technology*. 2003. V. 21(1). Pp. 283–299.
19. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. Chemical group composition and structure changes. *Petroleum Science and Technology*. 2004. V. 22 (3). Pp. 263–274.
20. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. III. Average molecular structure parameter changes. *Petroleum Science and Technology*. 2004. V. 22 (3). Pp. 275–286.
21. Reyes F.A., Daza C.E., Rondon H.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column. *Revista EIA*. 2012. V. 17. Pp. 47–56.
22. Glotova N.A., Gorshkov V.S., Kats B.I. Izmenenie reologicheskikh svoystv i khimicheskogo sostava bitumov pri starenii [Changes in rheological properties and chemical composition of bitumen during aging]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1980. No 4. Pp. 47–49. (rus)
23. Slobodchikov Yu.V. Issledovanie vliyaniya uslovij e'kspluatatsii na nadezhnost' bitumo-mineral'ny'x pokry'tij avtomobil'ny'x dorog Severnogo Kazaxstana: Avtoref. kand. dissert. [The influence of operating conditions on reliability of bitumen-mineral coatings of highways in Northern Kazakhstan. PhD Abstract]. Moscow. 1972. 32 p. (rus)
24. Mohammed A.A., Morshed K. The effect of ageing on physical and chemical properties of asphalt cement. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2008. V. 9, No. 2. Pp. 9–15.
25. Pshenichnykh O.A., Skorik D.S. Opyt primeneniya dispersno-armirovannykh asfal'tobetonov v dorozhnom stroitel'stve [Experience of using dispersion hardened asphalt concretes in road construction]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 141. Pp. 121–127. (rus)
26. Alshakhvan A., Kalgin Yu.I. Uluchshenie strukturno-mekhanicheskikh svoystv teplogo asfal'tobetona metodom polimerno-dispersnogo armirovaniya [Improving structural and mechanical properties of warm asphalt concrete by polymer dispersion hardening]. *Proektirovanie I stroitel'stvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonnelei*. 2021. No. 61. Pp. 53–61. (rus)
27. Pshenichnykh O.A. Deformatsionno-prochnostnye kharakteristiki dispersno-armirovannykh asfal'tobetonov [Deformation strength properties of dispersion hardened asphalt concrete]. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 143. Pp. 41–44. (rus)
28. Merzlikin A.E., Gamelyak I.P. Ispytaniya konstrukcij dorozhnykh odezhd dlya ocenki effektivnosti primeneniya dispersno armirovannogo asfal'tobetona [Effectiveness of pavement structures of dispersion hardened asphalt concrete]. *Trudy Soyuzdornii. Konstruirovanie, raschet i ispy'tanie dorozhnykh odezhd*. 1990. Pp. 17–25. (rus)
29. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: Interim report. *Journal of the Transportation Research Board*. 1983. No. 916. Pp. 6–18.
30. Tessoneau H. Revêtement tris mince mediflex en couche de voulement sur absur troisieme voie macon nord. *Revue Generale des Routes et des Aerodromes*. 1988. V. 62. No. 650. P. 77–78.
31. Pinaud Y., Hintzi J., Poirier J., Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans. *Revue Generale des Routes et des Aerodromes*. 1988. No. 649. Pp. 61–64.
32. Lukashevich V.N. Uvelicheniya sroka sluzhby asfal'tobetonnykh pokrytii za schet dvukhstadiinogo vvedeniya organicheskikh vyazhushchikh v protsesse proizvodstva asfal'tobetonnykh smesei [Service life increase of asphalt pavements by two-stage introduction of organic binders in asphalt concrete production]. *Stroitel'nye materialy*. 2003. No. 1. Pp. 24–25. (rus)
33. Florovskaya V.N., Ovchinnikova L.I. Lyuminescentnaya mikroskopiya bituminoznykh veshchestv [Luminescence microscopy of bituminous substances]. Moscow, 1970. 80 p. (rus).
34. Wertz J.E., Bolton J.R. Teoriya i prakticheskie prilozheniya primeneniya metoda EPR [Electron spin resonance: Elementary theory and practical applications]. Moscow: Mir, 1975. 368 p. (transl. from Engl.)
35. Unger F.G., Andreeva L.N. Fundamental'nye aspekty himii nefi. Priroda smol i asfal'tenov [Fundamental aspects of oil chemistry. The nature of resins and asphaltenes]. Novosibirsk: Nauka, 1995. 192 p. (rus)

36. Zhelezko E.P., Pechenyj B.G. O kinetike obrazovaniya i rekombinacii svobodny`x radikalov v bitumax [Kinetics of formation and recombination of free radicals in bitumen]. *Trudy So-yuzdornii*. 1970. No. 46. Pp. 137–142. (rus)

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

Мокшин Роман Ильич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mokshinroman@mail.ru

Authors Details

Viktor N. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vnluc@yandex.ru

Olga D. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, odluk@yandex.ru

Roman I. Mokshin, Research Assiatnt, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mokshinroman@mail.ru